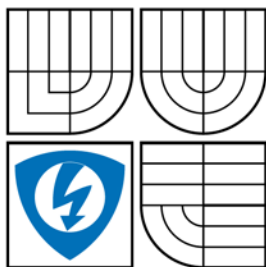


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KONCOVÝ ZESILOVAČ 2X400W/8 OHMŮ

2X400W/8 OHMS END AMPLIFIER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUKÁŠ KÁŇA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LADISLAV KÁŇA

BRNO 2009

Anotace

V předloženém textu je popsán výkonový zesilovač určený pro použití v hudební elektronice. V první části je rozebrána problematika nízkofrekvenčních zesilovačů obecně, včetně principů a jednotlivých druhů zapojení. Další část představuje popis vlastní koncepce výkonového zesilovače včetně schématu zapojení. Poslední část textu je věnována mechanické konstrukci přístrojové skříně a návrhu možného rozmístění modulů uvnitř zařízení.

Abstract

Submitted text deals with a power amplifier intended for usage in music electronics. First part is related to the common problems of low-frequency amplifiers including principles and individual circuit wiring types. Next part is related to description of self-made power amplifier including wiring scheme diagram. The end of the text concerns about mechanical construction of mounting box and design of possible module layout inside a device.

Klíčová slova

zesilovač, nízkofrekvenční, konstrukce, zvuk, výkonový

Keywords

Amplifier, low-frequency, construction, sound, power

KÁŇA, L. *Koncový zesilovač 2x400W/8W*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 53s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ladislav Káňa.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma *Koncový zesilovač 2x400W/8W* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavu Káňovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a veškeré rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| 1 Cíle projektu | 8 |
| 2 Výkonový zesilovač | 9 |
| 3 Druhy zapojení koncových stupňů | 10 |
| 3.1 Zapojení s diskrétními součástkami | 10 |
| 3.1.2 Komplementární zapojení koncových stupňů s bipolárními a Darlingtonovými tranzistory | 14 |
| 3.1.3 Kvazikomplementární koncový stupeň | 15 |
| 3.2 Integrované a hybridní zesilovače | 15 |
| 3.3 Koncové zesilovače s integrovaným budičem koncových tranzistorů | 16 |
| 4 Pomocné obvody koncových zesilovačů | 17 |
| 4.1 Vstupní obvody | 17 |
| 4.1.1 Přístrojový zesilovač | 18 |
| 4.2 Ochranné obvody koncových zesilovačů | 19 |
| 4.2.1 Měkký náběh zdroje – „Softstart“ | 20 |
| 4.2.2 Proudová pojistka | 21 |
| 4.2.3 Zpožděné připínání reproduktorů při zapnutí a jejich okamžité odpojení při vypnutí | 22 |
| 4.2.4 Ochrana proti stejnosměrnému napětí na výstupu | 23 |
| 4.2.5 Tepelná ochrana | 25 |
| 4.2.6 Detektor limitace | 26 |
| 5 Napájecí zdroje zesilovačů | 27 |
| 6 Mechanická konstrukce zesilovačů | 28 |
| 7 Zesilovač s integrovaným budičem LME49810 | 30 |
| 7.1 Koncový stupeň | 31 |
| 7.2 Ochranné obvody | 39 |
| 7.3 Softstart | 43 |
| 7.4 Napájecí zdroj | 44 |
| 7.5 Indikační LED panel | 46 |
| 8 Nastavení zesilovače a jeho uvedení do provozu | 47 |
| 9 Mechanická konstrukce | 50 |
| 10 Závěr | 51 |

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

SEZNAM OBRÁZKŮ

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1: Blokové schéma výkonového zesilovače | 9 |
| Obr. 2: Principiální zapojení zesilovače ve třídě A..... | 11 |
| Obr. 3: Protitaktní zapojení ve třídě B | 11 |
| Obr. 4: Převodní charakteristiky tranzistoru pro provoz ve třídě A a B | 12 |
| Obr. 5: Charakteristika $U_{\text{výst}}=f(U_{\text{vst}})$ - třída B (vlevo) a třída AB(vpravo) | 12 |
| Obr. 6: Protitaktní zapojení zesilovače ve třídě AB..... | 13 |
| Obr. 7: Koncový stupeň s teplotní kompenzací a možností nastavení předpětí..... | 14 |
| Obr. 8: Darlingtonův tranzistor | 14 |
| Obr. 9: Kvazikomplementární koncový stupeň | 15 |
| Obr. 10: Diferenční zesilovač | 17 |
| Obr. 11: Přístrojový operační zesilovač | 18 |
| Obr. 12: Příklad zapojení indikátoru vybuzení s obvodem LM3915 | 19 |
| Obr. 13: Monostabilní klopný obvod s obvodem NE555 | 21 |
| Obr. 14: Princip proudové pojistky | 22 |
| Obr. 15: Princip zpožděného spínání relé | 23 |
| Obr. 16: Princip ochrany proti stejnosměrnému napětí na výstupu | 24 |
| Obr. 17: Detekce stejnosměrného napětí | 25 |
| Obr. 18: Snímání teploty chladiče..... | 25 |
| Obr. 19: Princip detekce limitace | 26 |
| Obr. 20: Regulace zisku při limitaci zesilovače..... | 27 |
| Obr. 21: Typické zapojení napájecího zdroje pro koncový zesilovač | 28 |
| Obr. 22: Přístrojová skříň s chladiči tvořícími boční stěny skříně..... | 29 |
| Obr. 23: Blokové schéma zesilovače s obvodem LME49810 | 30 |
| Obr. 24: Doporučené zapojení obvodu LME49810 | 31 |
| Obr. 25: Schéma zapojení vstupního symetrického zesilovače | 32 |
| Obr. 26: SOA charakteristika tranzistorů 2SC5200 a 2SA1943 od firmy Toshiba | 33 |
| Obr. 27: Schéma zapojení indikátoru limitace | 35 |
| Obr. 28: Schéma zapojení indikátoru signálu | 36 |
| Obr. 29: Náhradní schéma reproduktoru..... | 37 |
| Obr. 30: Schéma zapojení koncového zesilovače s obvodem LME49810 | 38 |
| Obr. 31: Schéma zapojení ochranného obvodu..... | 42 |
| Obr. 32: Schéma zapojení omezení proudového nárazu..... | 43 |
| Obr. 33: Schéma zapojení napájecího zdroje..... | 45 |
| Obr. 34: Schéma zapojení pomocného napájecího zdroje | 45 |
| Obr. 35: Schéma zapojení indikačního LED panelu | 46 |
| Obr. 36: Pouzdro obvodu LME49810..... | 47 |
| Obr. 37: Chladič CHL353 dodávaný firmou EZK..... | 47 |

1 CÍLE PROJEKTU

V následující práci se budu zabývat návrhem koncového zesilovače, který by měl sloužit k ozvučovací účelům. Z této skutečnosti vyplývá i několik požadavků na budoucí zařízení a to především, co se týká ochrany koncového stupně, připojených reprosoustav a mechanického uspořádání celého zařízení.

Mým úkolem, vyplývajícím ze zadání projektu, je vestavět do stávající skříně zesilovače nový modul koncového stupně s tím, že budou použity některé mechanické (skřín, chladiče) a některé elektrické (toroidní transformátor, filtrační kondenzátory) díly z původního zesilovače. Tím se práce v podstatě omezuje na návrh a výrobu koncového stupně doplněného modulem ochranných obvodů.

Způsobů, respektive obvodových koncepcí, jak takový koncový stupeň realizovat, pokud pomineme zesilovače digitální, je v dnešní době několik. V zásadě se jedná o tři základní způsoby – realizace výhradně na bázi diskrétních součástek; zapojení s výkonovým integrovaným obvodem a zapojení s integrovaným budičem. Každé z těchto zapojení s sebou nese svá pro i proti.

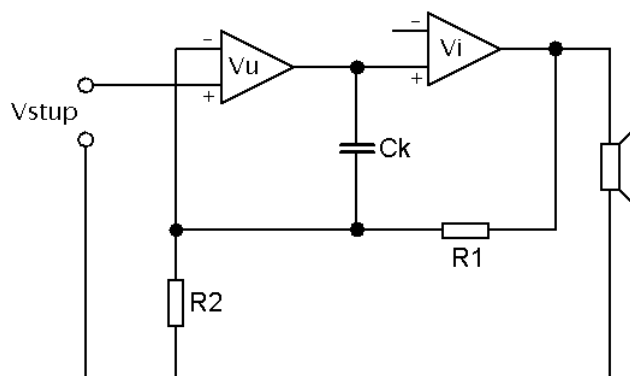
Obvody s diskrétními součástkami jsou poněkud komplikovanější, co se týká obvodového řešení (všechny části zesilovače - ať už vstupní obvody, napěťový budič i koncový stupeň jsou realizovány většinou výhradně s tranzistory) dosahují ovšem výborných parametrů v porovnání se zapojeními založenými na integrovaných obvodech. Rovněž výstupní výkony takových zesilovačů dosahují řádově stovek wattů. Obzvláště pak mezi zapřísáhlými „hifisty“ je hodně těch, kteří na tato zapojení nedají dopustit.

Další skupinu tvoří zapojení s výkonovými integrovanými obvody. Tato zapojení vynikají především jednoduchostí zapojení a minimem diskrétních součástek, které jsou nutné ke správné funkci zesilovače. Jedná se především o obvody vestavované do spotřební elektroniky jako jsou autorádia, domácí hifi sestavy apod., kde není kladen příliš velký důraz na kvalitu reprodukce a velikost výstupního výkonu. Většinou stačí k napájení těchto zesilovačů akumulátor, popř. zdroj nesymetrického napětí. Integrované obvody využívané v těchto zapojeních jsou relativně dostupné, rozšířené a jejich cena je přijatelná.

Mnohdy se ke konstrukci koncových stupňů využívá jakési kombinace předchozích dvou zapojení, které využívá jak integrovaný obvod, tak diskrétní součástky. Tato zapojení jsou založena na integrovaném budiči doplněném o diskrétní koncové tranzistory, popř. jiné pomocné obvody, jako jsou proudová pojistka, teplotní stabilizace koncového stupně apod. Tímto řešením se dají do jisté míry spojit výhody předchozích dvou zapojení a to především, co se týká množství použitých součástek v poměru k dosahovanému výstupnímu výkonu. Typickým představitelem této skupiny je integrovaný budič TDA7250 a od firmy SGS-Thomson.

2 VÝKONOVÝ ZESILOVAČ

Nízkofrekvenční výkonový zesilovač má jako poslední aktivní člen reprodukčního řetězce za úkol zesílit požadovaný signál s dostatečně velkým výstupním výkonem při přijatelně nízkém zkreslení. Lze si jej představit jako zesilovač napětí V_U na vstupu (viz obr. 1), který má za úkol mimo potřebného zesílení napětí i oddělení od předchozích stupňů předzesilovače. Musí vybudit následující proudový zesilovač V_I tak, aby tento stupeň byl schopen do připojeného reproduktoru odevzdat dostatečně velký (požadovaný) výkon.



Obr.1: Blokové schéma výkonového zesilovače

Vstupní část, tedy napěťový zesilovač koncového stupně výkonových zesilovačů, se skládá ze vstupního diferenciálního zesilovače, zdroje konstantního proudu a oddělovacího zesilovače. Toto uspořádání zhruba odpovídá i koncepci speciálního integrovaného obvodu - operačního zesilovače. Tyto operační zesilovače však měly až donedávna některé nevýhody, nectnosti, kvůli kterým nebyly příliš vhodné pro aplikace v nízkofrekvenčních zesilovačích. Vlastnosti, jako např. malá šířka přenášeného pásma, příliš vysoký vlastní šum nebo malá rychlost přeběhu, se však v poslední době podstatně zlepšily. Dnes již existují typy, které se mimo zlepšení výše vyjmenovaných parametrů vyznačují díky sériovosti výroby i poměrně přijatelnou cenou (velmi oblíbené a používané jsou např. obvody TL071, resp. TL072 nebo NE5534, resp. NE5532). [14], [15]

Následující proudový zesilovací stupeň je realizovatelný v podstatě pouze jako protitaktně pracující. Obsahuje mimo jiné ještě obvod pro nastavení klidového proudu, případně jeho stabilizaci, jakož i omezovač proudu s kontrolou teploty chladiče výkonového prvku. Toto dělení platí v zásadě jak pro integrované zesilovače, tak pro zesilovače konstruované z diskretních polovodičových součástek. Pro doplnění by bylo vhodné ještě vzpomenout zápornou zpětnou vazbu, zavedenou pomocí rezistorů R_1 a R_2 snižující napěťové zesílení. To má následně celou řadu důsledků působících kladně na parametry celého zesilovače, např. snížení celkového zkreslení, zvětšení šířky přenášeného pásma kmitočtů, aj. Pro celkové zesílení zesilovače se zápornou zpětnou vazbou platí následující vztah: [14]

$$V_U = 1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad [\text{V}] \quad (2.1)$$

Velký fázový posuv signálu mezi vstupem a výstupem zesilovače skrývá nebezpečí kladné zpětné vazby, jejímž důsledkem by mohlo dojít k rozkmitání celého zesilovače. Kompenzace tohoto je dosaženo kondenzátorem C_K .

Proudový zesilovač na výstupu určuje celkový výkon zesilovače. Z reklamních a komerčních důvodů uvádí mnoho výrobců různé druhy výkonů (hudební, maximální, ...). Tyto pojmy vychází z toho, že u nestabilizovaných napájecích zdrojů se napětí na filtračních kondenzátorech v pauze zvýší na maximum oproti napětí při plné zátěži. Při vybuzení trvalým sinusovým signálem musíme takto udávaný výkon poněkud "regulovat" faktorem 0,3 - 0,5. Hudební výkon je také poměrně dost závislý na druhu hudební produkce. Chceme-li pro porovnání dvou zesilovačů získat objektivní údaje o jejich výkonu, musíme vždy porovnávat výkony sinusové.

Napájecí napětí koncových zesilovačů s diskretními tranzistory (ale někdy i s výkonovými integrovanými obvody) bývají vyšší, než pro napájení nízkovýkonové části. Pro zvýšení výkonu je možné paralelně (ale i sériově) zapojit více koncových tranzistorů stejného druhu. [14]

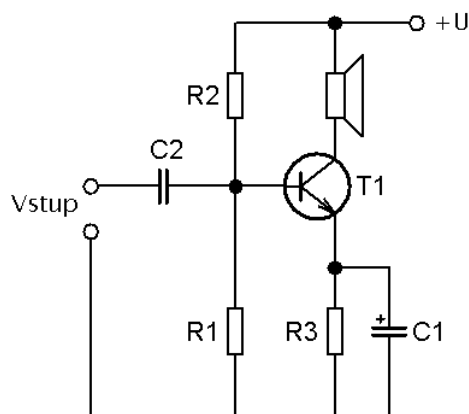
3 DRUHY ZAPOJENÍ KONCOVÝCH STUPŇŮ

Jak už bylo zmíněno v úvodní části, pokud se omezíme na čistě „analogové“ řešení koncového stupně, máme zpravidla tři možnosti, jak zapojení obvodově řešit – zcela diskretně, s použitím výkonového integrovaného obvodu, popř. s integrovaným budičem doplněným o diskretní koncové tranzistory.

3.1 Zapojení s diskretními součástkami

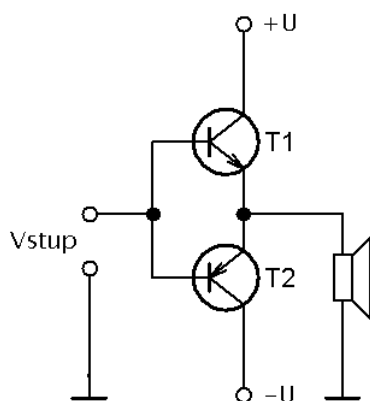
Dalo by se říci, že zesilovač jako takový vychází ze stejného obvodového řešení, ať už se jedná o zapojení ryze diskretní či s použitím integrovaných obvodů. Skládá se většinou ze stejných funkčních částí, které jsou více či méně spojeny v menší celky - integrovány do čipů. Zpravidla vždy obsahuje koncový stupeň vstupní obvody zpracovávající signál nízké úrovně, napěťový zesilovač, někdy taky nazývaný jako rozkmitový stupeň, a proudový zesilovač jako poslední (výstupní) část. Protože principiálně jsou si jednotlivá řešení hodně podobná, bude podrobněji pojednáno právě o diskretním zapojení.

Pokud porovnáme různá zapojení koncových stupňů, zjistíme, že se budou lišit hlavně nastavením klidového pracovního bodu. Na obr. 2 si můžeme prohlédnout schéma nejjednoduššího řešení koncového stupně. Jedná se o jednočinné zapojení koncového stupně ve třídě A. Zátěž (reproduktor) je zapojena do kolektorového obvodu koncového tranzistoru a protéká jím celý klidový proud tranzistoru. Abychom dosáhli optimálního vybuzení tranzistoru, musí být klidový proud nastaven na 0,5 násobek špičkového kolektorového proudu a to předpětím báze, neboli změnou poměru rezistorů R_1 a R_2 . Hlavní výhodou zesilovačů pracujících ve třídě A je jejich velmi malé zkreslení, naopak nevýhodou je pak velmi malá účinnost, jakož i relativně malý výstupní výkon. V jednočinném zapojení navíc protéká reproduktorem (zátěží) stejnosměrný proud, který způsobuje jeho předmagnetizaci. Z tohoto důvodu se zapojení zesilovačů ve třídě A používá většinou jen v obvodech předzesilovačů. [14]



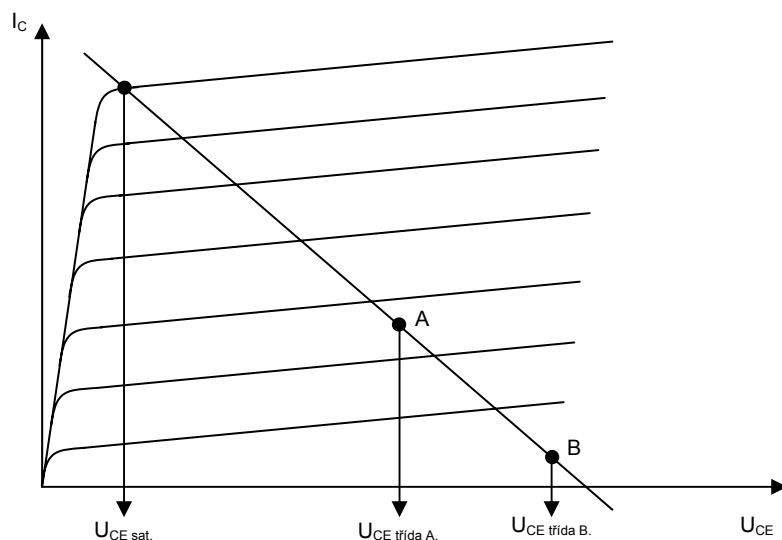
Obr. 2: Principiální zapojení zesilovače ve třídě A

Podstatně vyššího výstupního výkonu lze dosáhnout např. použitím zapojení podle obr. 3. Koncový zesilovač zde tvoří komplementární dvojice tranzistorů ve dvoučinném zapojení emitorových sledovačů ve třídě B. Napájení je zde symetrické a zátěž je připojena přes spojené emitory obou tranzistorů na zem. Oba koncové tranzistory zde pracují bez předpětí. Přivedeme-li na vstup střídavý signál, budou se střídavě oba tranzistory otvírat po dobu jedné půlperrody. Z převodní charakteristiky na obr. 4 je celá situace zřejmá: na ose x je napětí mezi kolektorem a emitorem U_{CE} , na ose y kolektorový proud. Na zatěžovací přímce charakteristiky jsou vidět pozice pracovního bodu zesilovače ve třídě A a B. Jelikož tranzistory pracují bez předpětí, leží pracovní bod třídy B až na okraji zatěžovací přímky. Každý z tranzistorů zesiluje jenom jednu půlvlnu. Vinou chybějícího předpětí se začnou tranzistory otvírat až asi od cca 0,5V mezi bází a emitorem. [14] To způsobuje, že zesilovač pracující ve třídě B má při malých signálech velké přechodové zkreslení. Největší výhoda tohoto zapojení je ve poměrně velké účinnosti, která dosahuje asi 78%. Maximální ztrátový výkon na koncových tranzistorech je jen asi 20% výstupního výkonu.



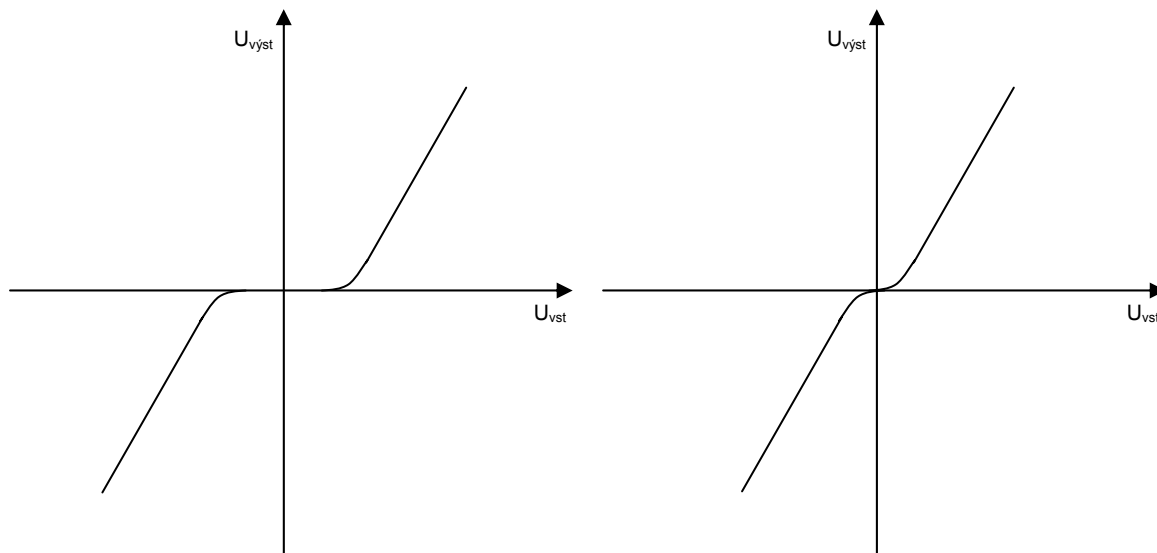
Obr. 3: Protitaktní zapojení ve třídě B

Jak již bylo uvedeno, v protitaktním zapojení je vždy jeden tranzistor vodivý. To však platí pouze pro kmitočty, které jsou nízké v porovnání s mezní frekvencí použitých tranzistorů, neboť tranzistor potřebuje určitý čas, aby se vrátil z vodivého do uzavřeného stavu. Překročí-li rychlost nárůstu vstupního napětí tento čas, hrozí nebezpečí, že se vyskytnou oba tranzistory ve vodivém stavu současně. Toto by mohlo vyvolat tak velké proudy, že oba tranzistory by mohly být tímto zničeny.



Obr. 4: Převodní charakteristiky tranzistoru pro provoz ve třídě A a B

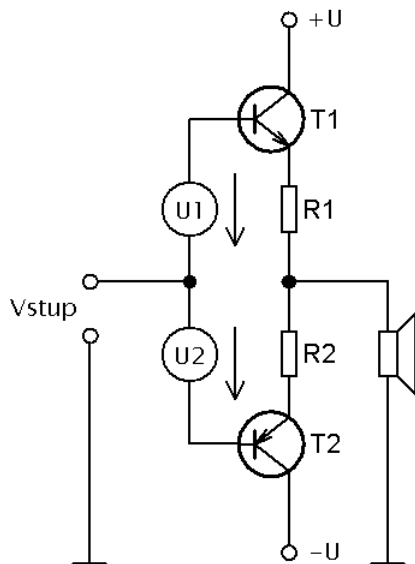
Abychom minimalizovali velikost přechodového zkreslení, musí tranzistory protékat klidový proud. Jinými slovy by se dalo říct, že přechody báze-emitor koncových tranzistorů musí pracovat s předpětím. Jak je vidět na obr. 5, zkreslení nebylo zcela odstraněno, ale podstatně sníženo. Toto zapojení charakterizuje třídu zesilovačů AB. Princip tohoto zapojení je patrný z obr 6.



Obr. 5: Charakteristika $U_{výst}=f(U_{vst})$ - třída B (vlevo) a třída AB(vpravo)

Největším problémem zesilovačů třídy AB je udržet v celém teplotním rozsahu konstantní klidový proud. Ohřevem koncových tranzistorů se totiž klidový proud zvětšuje. To vede k dalšímu ohřevu tranzistorů, a tak dojde k jejich následnému zničení tepelným průrazem. Tento efekt je označován jako termická kladná zpětná vazba. Z tohoto důvodu se musí napětí U_1 a U_2 (viz obr.7) při zvyšování teploty snižovat. K tomuto účelu bylo vyvinuto několik různých zapojení, např. s termistorem, diodou, které jsou v úzkém teplotním kontaktu s koncovými tranzistory (jsou umístěny na chladiči). Tato teplotní kompenzace není zcela dokonalá, protože vždy existuje jistý teplotní rozdíl mezi přechodem výkonového

tranzistoru a teplotním čidlem. Z tohoto důvodu jsou zde zapojeny rezistory R1 a R2, zajišťující proudovou zpětnou vazbu. Jejich vliv bude tím větší, čím vyšší bude jejich ohmická hodnota. Protože však jsou tyto rezistory zapojeny v sérii se zátěží, musí být nalezen kompromis mezi výkonovou ztrátou na těchto rezistorech a nutnou proudovou zpětnou vazbou. V praxi hodnota těchto rezistorů nepřesahuje cca $0,5\Omega$.

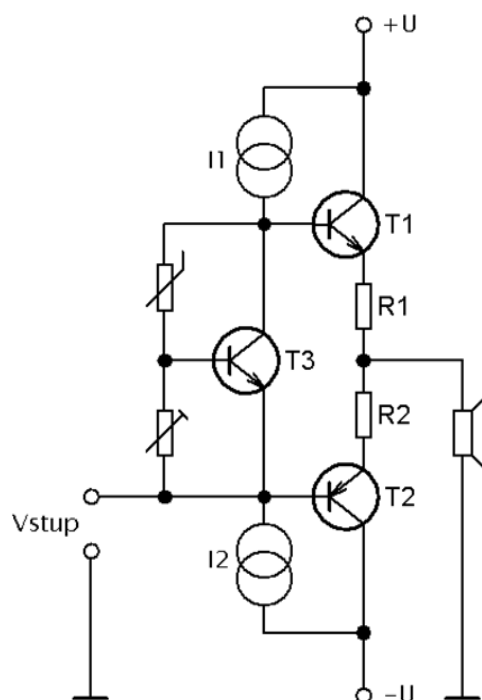


Obr. 6: Protitaktní zapojení zesilovače ve třídě AB

Pro názornost si nyní ukažme jednu z možných variant zapojení, která zaručuje optimální teplotní stabilitu a současně umožňuje nastavení vhodného předpětí a tím i klidového proudu koncových tranzistorů. Je to zapojení na obr. 7. Předpětí bází obou koncových tranzistorů je dáno hodnotou napětí U_{CE} tranzistoru T3. Použitý termistor R3 a trimr R4 tvoří dělič napětí. Při zanedbání proudu báze platí rovnice: [14]

$$U_{CE} = U_{BE} \left(1 + \frac{R3}{R4} \right) \quad [V] \quad (3.1)$$

Jak z tohoto vzorce vyplývá, lze předpětí ovlivňovat změnou rezistorů R3 a R4. Termistor R3 zaručuje teplotní stabilitu zapojení a musí proto být v termickém kontaktu s koncovými tranzistory. Jako teplotní čidlo lze použít přímo tranzistor T3, termistor R3 pak můžeme vynechat. To lze také odvodit z uvedené rovnice, protože teplotně závislé napětí U_{BE} určuje rovněž velikost předpětí U_{CE} . Klidový proud koncových tranzistorů lze nastavit trimrem R4. Oba zdroje konstantního proudu I1 a I2 dodávají proud do bází koncových tranzistorů. Proud I1 musí být v každém případě vyšší, než maximální proud báze T1 a T2. Hodnotu tohoto proudu lze vypočítat tak, že podělíme výstupní proud I_{VYST} proudovým zesilovacím činitelem tranzistoru T1. Ten nebývá příliš velký, hodnota u výkonových tranzistorů se pohybuje v intervalu cca 5 až 20. To znamená, že proud I1 nebude zrovna nízký. Zde tedy musí být každopádně použito zapojení zdroje konstantního proudu s tranzistory. Jednoduché zapojení se sériovým rezistorem by nebylo příliš vhodné, protože při zvětšujícím se buzení by proud rezistorem klesal, což by bylo paradoxní. O výkonovém zesilovači by v tomto případě nedalo hovořit.

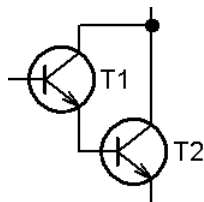


Obr. 7: Koncový stupeň s teplotní kompenzací a možností nastavení předpětí

3.1.2 Komplementární zapojení koncových stupňů s bipolárními a Darlingtonovými tranzistory

Jedná se o dnes asi nejpoužívanější typ zapojení koncových zesilovačů. Pro použití v koncových stupních zesilovačů nabízejí výrobci polovodičových součástek široký sortiment párovaných komplementárních výkonových tranzistorů, se kterými je možno konstruovat výkonové zesilovače s vysokou tepelnou stabilitou a výbornými parametry.

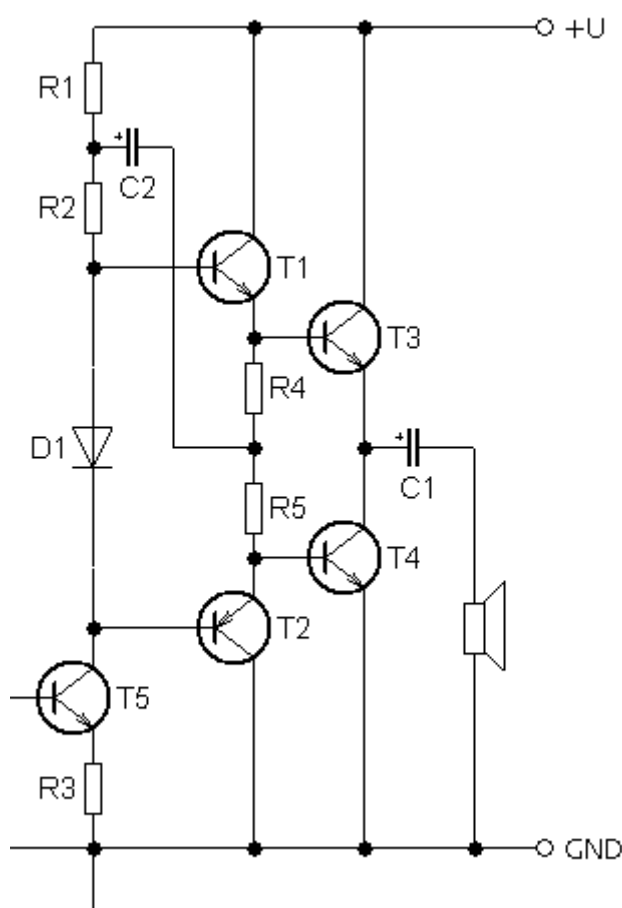
Pro vyšší výstupní výkony se často používají Darlingtonovy komplementární tranzistory. Ty obsahují dva kaskádně zapojené tranzistory. Emitor prvního je spojen s bází druhého tranzistoru a současně jsou propojeny oba kolektory (viz obr. 8). Proudové zesílení je vysoké, vyšší než 1000. S malými řídicími proudy je možno dosáhnout velmi vysokých výstupních výkonů. Při použití Darlingtonových tranzistorů se konstrukce výkonových zesilovačů s vyššími výstupními výkony podstatně zjednoduší. Pokud ztrátový výkon budiče je velký a začíná ovlivňovat celkovou účinnost, měly by se použít Darlingtonovy tranzistory.



Obr. 8: Darlingtonův tranzistor

3.1.3 Kvazikomplementární koncový stupeň

U kvazikomplementárních koncových stupňů se používají tranzistory téže vodivosti. Jejich báze jsou buzeny sice stejně velkým napětím, ale v protifázi. Tyto dva budící signály s opačnou fází se vytvoří v budícím stupni s komplementárními párovanými tranzistory malého výkonu. Tento budič v komplementárním zapojení musí dodat dostatečný proud pro buzení kvazikomplementárního koncového stupně. Toto zapojení bylo rozšířené v době, kdy byly výkonové komplementární tranzistory hůře dostupné. [14]



Obr. 9: Kvazikomplementární koncový stupeň

3.2 Integrované a hybridní zesilovače

Speciální skupinu tvoří tzv. integrované zesilovače. Jedná se o vícevývodové součástky, které na jednom čipu obsahují více funkčních celků. Moderní monolitické nebo hybridní zesilovače značně zjednodušují konstrukci NF zesilovačů. V dnešní době se zesilovače konstruované z diskrétních součástek s výstupním výkonem do cca 30W prakticky nepoužívají. Ty nahradily právě zesilovače, jejichž konstrukce je založena na jednom prvku – integrovaném obvodu. Monolitické integrované výkonové zesilovače jsou většinou konstruovány, jak již bylo uvedeno, jako výkonové operační zesilovače s doplňkovými obvody, např. elektronickými ochranami proti:

- přetížení a zkratu na výstupu
- tepelné deformaci čipu

- přepólování napájecího napětí
- napětíovým špičkám v napájecím napětí
- napětíovým špičkám vlivem indukční zátěže

Ne každý obvod musí obsahovat uvedené ochrany. Např. ochranou proti napětíovým špičkám se vybavují především zesilovače, jejichž provoz se předpokládá např. v automobilech. Moderní obvody jsou vybaveny automatickým řízením pracovního provozu ve spolehlivé oblasti (SOA). Tento ochranný obvod má za úkol zmenšit buzení koncového stupně v případě, že vybuzení přesáhne hyperbolu maximálního ztrátového výkonu pro danou teplotu.

Některé zesilovače mohou být vybaveny např. obvodem pro potlačení typického „lupnutí“ při zapínání nebo vypínání zesilovače. Tento nepříjemný akustický jev nastává v době, kdy po zapnutí zesilovače dochází k ustálení stejnosměrných poměrů. Toto se může stát osudným pro připojené elektroakustické měniče (především pro výškové reproduktory). [13]

3.3 Koncové zesilovače s integrovaným budičem koncových tranzistorů

Poslední skupinou zesilovačů, o které zde padne zmínka, jsou zesilovače, které ke své činnosti využívají vstupní obvody a budič integrovaný na jednom čipu - ve společném pouzdře. Vnitřní zapojení obvodu odpovídá zapojení, které by se dalo realizovat i s diskrétních součástek, vše je však implementováno do jednoho funkčního bloku. Výhodou tohoto zapojení je relativní jednoduchost obvodu, kdy by teoreticky stačilo doplnit budič o koncové tranzistory. V praxi se ale obvod dále doplňuje minimálně o proudovou pojistku. Tyto obvody lze napájet vyšším napětím (zpravidla symetrickým), což umožňuje dosáhnout vyšších výstupních výkonů. I tyto koncepce mají své hranice – výstupní výkony se pohybují v řádu stovek wattů, vyšších výkonů lze dosáhnout například zapojením dvou koncových stupňů, které pracují do společné zátěže, doplněných invertorem signálu – tzv. můstkové zapojení.

Použití integrovaného budiče má mezi konstruktéry nízkofrekvenčních zařízení své příznivce i odpůrce. Mezi výhody použití integrovaného budiče by se dala zahrnout celková cena modulu, relativní dostupnost integrovaných obvodů tohoto typu, reprodukovatelnost a snad i jednoduchost zapojení. Oproti tomu nelze v podstatě nesouhlasit s názory, že použití tohoto obvodu nese s sebou určitá rizika vyplývající právě ze snahy integrovat „vše“ na jeden čip. Mezi slabiny obvodu patří určitě horší odvod tepla z čipu, nehledě na to, že někteří výrobci dodávají obvody v pouzdrech DIL, která neumožňují montáž obvodu na hladič a tím zajistit efektivní chlazení a zaručit bezpečnější a co možná nejneporuchovější provoz zařízení.

Jedním z představitelů integrovaných budičů je obvod TDA7250 od firmy SGS Thomson. Jedná se o duální obvod předurčen pro stavbu stereo-zesilovačů s použitím komplementárních výkonových tranzistorů. Obvod se napájí symetrickým napětím o maximální velikosti $\pm 45\text{V}$ a lze s tímto obvodem dosáhnout výstupního výkonu cca $2 \times 150\text{W}$ (záleží na velikosti napájecího napětí a typu použitých koncových tranzistorů).

4 POMOCNÉ OBVODY KONCOVÝCH ZESILOVAČŮ

4.1 Vstupní obvody

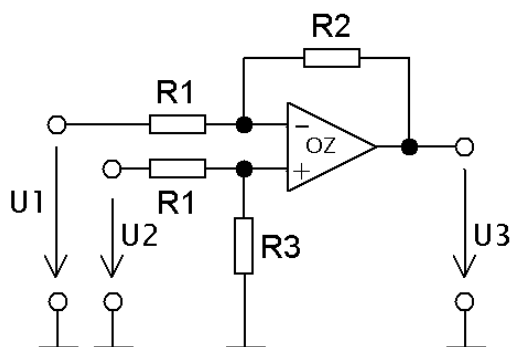
Úkolem vstupního obvodu je, mimo jiné, malý signál ze zdroje, např. z mikrofону, zesílit na úroveň vhodnou pro další zpracování. Vzhledem k impedanci zdroje signálu by měl mít vstupní obvod velkou vstupní a malou výstupní impedanci ve srovnání s impedancí zátěže.

Vstupní obvod může mít tyto úkoly:

- převod symetrického signálu na nesymetrický
- zesílení signálu
- úroňové a impedanční přizpůsobení
- volba a směšování vstupů
- kmitočtové korekce

Vstupní obvod nesmí ovlivňovat zdroje signálu a to ani v případě směšování z více zdrojů. Dále musí mít velmi malý šum (použití nízkošumových aktivních a pasivních součástek) a velký odstup cizích napětí (zamezení vzniku zemních smyček, filtrace napájení, blokování), protože zesiluje velmi malá napětí (menší než 1mV). Musí být navržen tak, aby byl odolný proti přebuzení. Lineární předzesilovače jsou takové zesilovače, které neovlivňují frekvenční charakteristiku. Jejich charakteristika je v celém akustickém pásmu rovná (lineární).

V profesionální ozvučovací technice se k přenosům signálů používá výhradně symetrické vedení realizované třemi vodiči, přičemž dva z nich jsou signálové a jeden stínící. Výhodou této koncepce je odolnost proti rušení. Zesilovač jako takový ovšem symetrický signál zpracovávat nedokáže. Je tedy nutné signál symetrický „znesymetrizovat“. K převodu signálu symetrického na nesymetrický se nejčastěji využívá speciálního zapojení třech operačních zesilovačů – tzv. přístrojový zesilovač, jehož obecné schéma je na obrázku níže. Jinou možností je použití samostatného diferenčního zesilovače. [12]



Obr. 10: Diferenční zesilovač

Signálové vodiče mají stejně velký potenciál napětí vzhledem ke stínění (zemi), ale opačnou polaritu jednoho vůči druhému. Stínění symetrické linky nepřenáší žádný užitečný

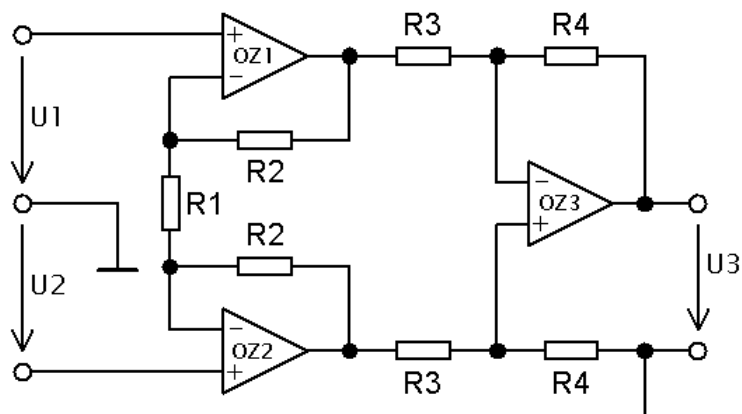
signál a je určeno k odvádění rušivých proudů, které se mohou indukovat v kabelu z externích zdrojů rušení.

Symetrické vstupní obvody jsou navrženy tak, aby reagovaly jen na rozdíly napětí mezi těmito dvěma vodiči. Pokud nějaká elektrostatická interference nebo rušení prochází skrze symetrický kabel, rušivé napětí se objeví ve stejné polaritě na obou signálových vodičích. Je pak vstupním rozdílovým zesilovačem odstraněno. [11]

Další výhodou je možnost galvanického oddělení zemního potenciálu spojovaných přístrojů. Protože obecně platí, že zemní potenciál dvou přístrojů není nikdy dokonale stejný, prochází při normálním propojení zemním vodičem vyrovnávací proud. Pracovní zem přístroje nemá nulový odpor, průchodem vyrovnávacího proudu je zemní potenciál vstupního obvodu návazného přístroje modulován (nejedná se totiž jen o stejnosměrný proud, ale i o “zbytky“ síťového kmitočtu a jejich vyšší harmonické, což způsobí, že se vzniklý brum přenesení i na vstup a je pak dále zesílen. Problematika je ještě složitější i přístrojů první bezpečnostní třídy, které mají kostru a zpravidla i pracovní zem připojenou na ochranný vodič. Připojíme-li dva takovéto přístroje, vytvoří se smyčka, do které se indukují rozptylová pole transformátorů a silových rozvodů. [19]

4.1.1 Přístrojový zesilovač

Přístrojový zesilovač se skládá ze tří operačních zesilovačů. Operační zesilovač OZ3 je zapojen jako rozdílový (diferenční), operační zesilovače OZ1 a OZ2 se chovají současně jako invertující a neinvertující zesilovače.



Obr. 11: Přístrojový operační zesilovač

Zesílení přístrojového zesilovače je dáno vztahem: [12]

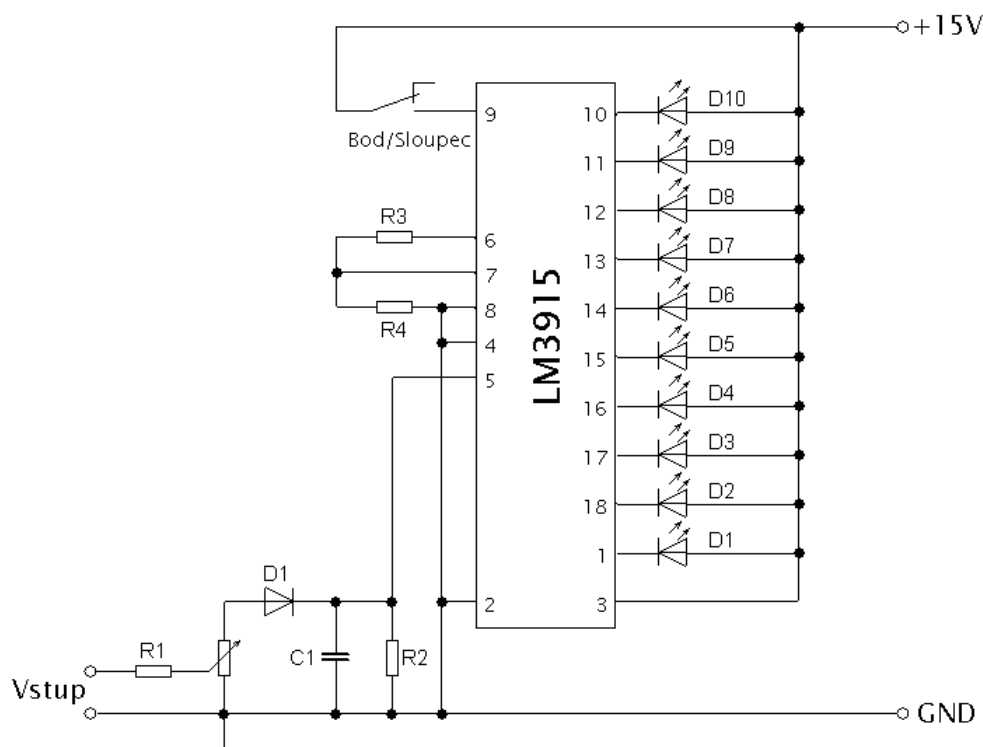
$$U_D = U_2 - U_1 \quad [\text{V}] \quad (4.1)$$

$$A_U = \frac{U_3}{U_D} = \frac{U_3}{U_2 - U_1} \quad [-] \quad (4.2)$$

$$A_U = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) \quad [-] \quad (4.3)$$

Aby nedocházelo k přebuzení zesilovače a nebo naopak k malému buzení, kdy se zhoršuje poměr mezi užitečným signálem a šumem, je dobré kontrolovat velikost budícího signálu. Z tohoto důvodu jsou vstupní obvody poměrně často doplňovány o indikátory přítomnosti, popř. velikosti vstupního signálu. Zpravidla stačí, aby uživatel měl přehled o tom, zda do přístroje signál přichází (indikace přítomnosti signálu) a dále pak, aby byl upozorněn v případě, kdy se zesilovač blíží k prahu limitace. Tyto obvody jsou řešeny buď za pomoci integrovaných obvodů k tomu navržených (např. obvod LM3915) nebo s využitím operačního zesilovače zapojeného jako komparátor, kdy se porovnává okamžitá velikost výstupního napětí zesilovače s napětím napájecím.

Někdy (to ovšem není případ koncových zesilovačů určených pro nasazení v profesionální technice) se indikátory vstupní úrovně doplňují o indikaci špičkových hodnot pro zaznamenání i velmi krátkých přebuzení. Pomocí tohoto rychlého indikátoru je možné udržovat signál na optimální úrovni. Zpětný chod ukazatele, tedy pohasínání LED diod, je zpomalen, aby byly patrné i krátké impulzy.



Obr. 12: Příklad zapojení indikátoru vybuzení s obvodem LM3915 (upraveno podle [13])

Podrobněji o způsobu řešení indikátorů bude pojednáno v kapitole 4.2.6.

4.2 Ochranné obvody koncových zesilovačů

Zesilovač, jako finální přístroj není kompletní a plnohodnotný, pokud neobsahuje elektronické obvody, které zajišťují bezpečný provoz jak samotného zesilovače, tak připojených reproduktorových soustav. Ceny reproduktorů, zvláště těch, které se osazují do boxů určených pro ozvučovací účely, jsou mnohdy až závratné, nevyplatí se proto riskovat

jejich připojení na „nechráněný“ zesilovač. Při průrazu koncových tranzistorů se může stejnosměrné napájecí napětí dostat až k reproduktorům a ty spolehlivě zničit.

4.2.1 Měkký náběh zdroje – „Softstart“

V okamžiku zapnutí zesilovače může vzniknout vlivem magnetizačního proudu transformátoru a nenabitého filtračního kondenzátoru zdroje velký impulsní odběr, který je tím větší, čím více se průběh síťového napětí v okamžiku zapnutí blíží 90° nebo 270° periody. U zesilovačů většího výkonu, jejichž síťový transformátor a filtrační kapacity jsou již značně velké, může být proudový náraz tak silný, že způsobí výpadek běžného jističe v síťovém rozvodu, v lepším případě přepálení síťové pojistky přístroje. Vnitřní odpor primárního vinutí velkého transformátoru takovýchto zesilovačů je tak malý, že jeho zkratový příkon může dosáhnout několik kW. Navíc dosahují nabíjecí proudy filtračního kondenzátoru desítek ampérů. Tento proud je zpravidla větší než maximální proud povolený výrobcem, což vede ke značnému snížení životnosti kondenzátorů, neboť se časem přepálí vnitřní přívod k elektrodám.

Z popsaných důvodů je bezpodmínečně nutné zesilovač většího výkonu vybavit obvodem, který proudový náraz zmenší. Často se proto používá předřadný, dostatečně dimenzovaný odpor na primární straně transformátoru, který je po chvíli zkratován, zpravidla pomocí relé. Velikost odporu je kompromisem mezi velikostí proudového nárazu (čím větší odpor, tím menší proud) a velikostí druhého proudového nárazu, který vznikne zkratováním - přemostěním odporu (čím menší odpor, tím menší proud). Výhodou tohoto řešení je jednoduchost a cena, nevýhodou právě druhý proudový náraz. [19]

Jiným způsobem omezování proudového nárazu při zapínání zesilovače je zařazení termistoru se záporným teplotním součinitelem odporu (s rostoucí teplotou klesá jeho elektrický odpor) do primárního okruhu transformátoru. Při zapnutí zesilovače má ohlazený termistor vyšší odpor, který způsobuje omezení proudu při zapínání podobně, jako v předchozím případě rezistor. Vlivem průchodu proudu se termistor zahřívá a dochází k poklesu jeho vnitřního odporu. Proud procházející primárním vinutím transformátoru tak není omezován. Výhoda použití termistoru je pouze v naprosté jednoduchosti, kdy není k funkci nutný žádný další elektronický obvod. Naproti tomu přehřátí termistoru může v extrémním případě vést až k požáru uvnitř přístroje. Další nevýhodou je tepelná setrvačnost termistoru. Pokud dojde v krátkém časovém úseku po vypnutí zesilovače k opětovnému zapnutí, termistor se neochladí na patřičnou teplotu a ochrana tak ztrácí svůj efekt. Z těchto důvodů není použití tak jednoduchého obvodu doporučováno. Lze se s ním ovšem setkat u laciných přístrojů s toroidními transformátory ne příliš vysokých výkonů.

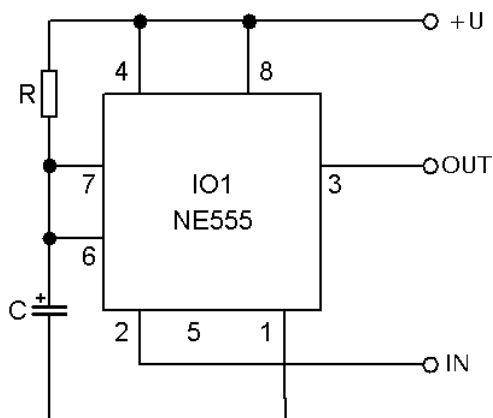
Mnohdy se termistory se záporným součinitelem odporu používají na místě rezistorů v obvodech popsaných v prvním případě.

Další způsob spočívá v použití fázově řízeného triaku, který je postupně otevírán v rozsahu 0° až 90° , případně 180° až 270° periody. Po úplném náběhu je pak zkratován pomocí relé, aby nezpůsoboval rušení. Výhodou je naprosto plynulý náběh s minimálním proudovým rázem, nevýhodou větší složitost a cena obvodu. [19]

Obvody pro zpožděné spínání relé se řeší taky více způsoby. Jednou z možností je použití časovače např. s obvodem 555 zapojeného jako monostabilní klopný obvod, kde doba,

za kterou dojde k přitáhnutí kotvy relé je dána hodnotami součástek v RC členu určujícím časovou konstantu obvodu. [9]

$$T = 1.1 \cdot R \cdot C \quad [s] \quad (4.4)$$



Obr. 13: Monostabilní klopný obvod s obvodem NE555

Jinou, podobnou možností, kde se využívá nabíjení kondenzátoru přes rezistor, je použití komparátoru porovnávajícího okamžitou hodnotu napětí na kondenzátoru s referenčním napětím. Po dosažení hodnoty referenčního napětí dojde k překlopení komparátoru a pak následnému sepnutí kontaktů relé.

4.2.2 Proudová pojistka

Při nedodržení minimální zatěžovací impedance nebo v horším případě při zkratu na výstupu by mohlo vlivem nadproudu dojít k poškození, popř. zničení koncových tranzistorů. Proto musí každý zesilovač obsahovat elektronický obvod, který by měl tomuto zamezit.

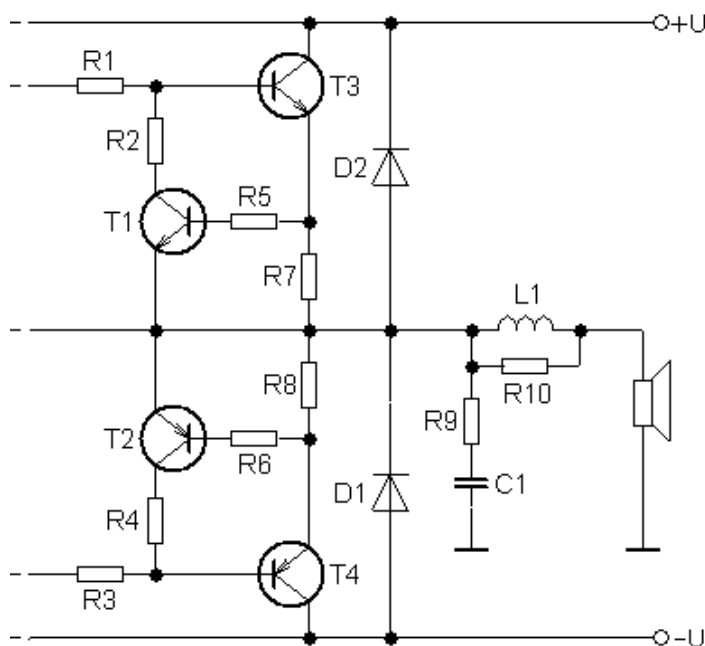
Jsou v zásadě dvě možnosti, jak se dá proudová ochrana řešit. První způsob je plynulé omezení buzení koncových tranzistorů při překročení předem nastavené maximální hodnoty výstupního proudu. Druhý způsob taky sleduje velikost výstupního proudu a v případě překročení maximální úrovně dojde na určitou dobu k odpojení signálu na vstupu zesilovače a tím k poklesu proudu na výstupu. Po určité době (pokud dojde k odstranění závady) je vstupní signál znovu připojen a pokračuje buzení koncového stupně.

Princip ochrany proti přetížení nebo zkratu na výstupu omezením buzení koncových tranzistorů je naznačen na obr. 14. Skládá se z tranzistorů T1, T2 a snímacích rezistorů R7, R8. Jedná se o emitorové odpory, které jsou důležité pro rovnoměrné rozdělení proudu jednotlivými paralelně řazenými koncovými tranzistory, které díky tomu nevyžadují párování. Běžně se používají odpory $0,15\Omega$ až $0,5\Omega$. Při vzrůstu výstupního proudu se úbytek na těchto rezistorech zvětší natolik, že se začínají otevírat tranzistory T1 a T2 (úbytek napětí na emitorových odporech dosahuje velikosti napětí U_{BE} tranzistorů T1 a T2). Dochází k otevírání tranzistorů a ke zmenšování buzení koncových tranzistorů. Tím se snižuje proud jimi procházející a výstupní výkon klesá. Emitorový rezistor tedy musí být volen tak, aby při maximálním předpokládaném proudu do jmenovité zátěže ještě neomezil buzení. Velikost

výstupního proudu, při kterém dochází k jeho omezování se tedy nastaví rezistory R7 a R8 a velikost proudu při zkratu rezistory R2 a R4.

Diody D1 a D2 chrání koncové tranzistory proti průrazu vlivem připojení indukční zátěže. Případné impulzy, které by mohly koncové tranzistory poškodit jsou eliminovány propustně polarizovanými diodami.

Tzv. Boucherotův člen, tedy RC člen zapojený na výstupu proti nulovému potenciálu, slouží pro eliminaci případného rozkmitání vlivem nárůstu impedance indukční zátěže na vysokých frekvencích.



Obr. 14: Princip proudové pojistky

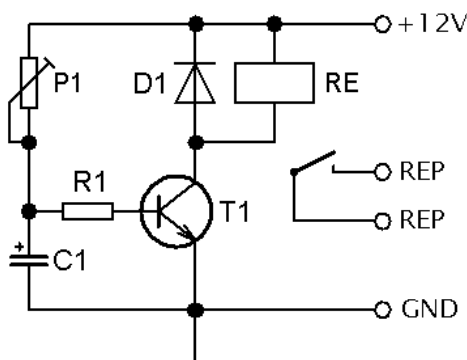
4.2.3 Zpožděné připojení reproduktorů při zapnutí a jejich okamžité odpojení při vypnutí

Při zapínání nebo vypínání zesilovače (napájecího napětí) dochází v zesilovači k přechodovému jevu a ustálení napětí, což se projevuje jakýmsi „lupnutím“ v reproduktorech. Tento, pro posluchače nepříjemný akustický jev, může vést v extrémním případě až k poškození připojených reproduktorů, zvláště pak vysokotónových. U zesilovačů se proto používá elektronický obvod, který za pomoci relé zajistí, že zátěž bude na výstup zesilovače připojena až po určité době po zapnutí přístroje, kdy vnitřní poměry jsou ustáleny. Tato zapojení většinou využívají opět principu "nabíjení kondenzátoru přes rezistor". Napětí na kondenzátoru je sledováno a pomocí komparátoru porovnáváno s napětím referenčním. To se na vstupu komparátoru objeví ihned po zapnutí přístroje, kdežto napětí na kondenzátoru se zvyšuje postupně. Jakmile toto napětí dosáhne velikosti referenčního, dojde k překlapaní komparátoru a následně, např. za pomoci tranzistoru k sepnutí relé, které připojí zátěž k výstupu zesilovače.

Okamžitého odpojení zátěže při vypnutí se dá dosáhnout použitím dvojitého síťového spínače, kde jeden kontakt se použije pro připojování napájecího napětí přístroje, druhý kontakt je použit k přerušování ovládacího napětí relé. Po zapnutí dojde k přitáhnutí kotvy

relé až se zpožděním, po vypnutí přístroje se tímto kontaktem přeruší ovládací napětí relé, které okamžitě odpojí zátěž od výstupu zesilovače.

Je možné použít rovněž zjednodušeného zapojení např. podle obr. 15. Jedná se o jednoduché zapojení s jedním spínacím tranzistorem. Toto zapojení se nedá ovšem kombinovat s žádnou další ochranou, jako je tomu např. u zapojení předcházejícího.



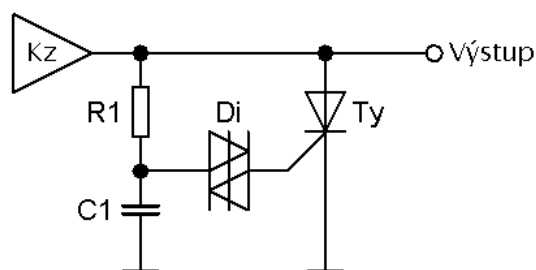
Obr. 15: Princip zpožděného spínání relé

4.2.4 Ochrana proti stejnosměrnému napětí na výstupu

Dalším velkým nebezpečím hlavně pro připojené reproduktory je přítomnost stejnosměrného napětí na výstupu zesilovače. Protože většina dnes používaných zapojení je napájena symetrickým napájecím napětím, je reproduktor připojen k výstupu zesilovače přímo – bez použití vazebního kondenzátoru. Při sebemenší poruše zesilovače hrozí rozvážení zpětné vazby a na výstupu zesilovače se objeví stejnosměrné napětí. Při proražení koncových tranzistorů jsou reproduktory připojeny dokonce přímo k napájecímu napětí. Reprodukter je konstruován tak, že dokáže zpracovávat střídavé signály – kmitací systém je neustále v pohybu a tím se ochlazuje. Pokud se do kmitací cívky dostane stejnosměrné napětí, zvláště o velikosti napájecího napětí zesilovače, dojde velmi rychle k přepálení kmitací cívky, popř. k deformaci kmitacího systému. Protože cena reproduktorů používaných v ozvučovací technice je nesrovnatelná s cenou koncových tranzistorů použitého zesilovače, malá investice do takového ochranného obvodu se rozhodně vyplatí.

Asi nejjednodušší ochranu proti stejnosměrnému napětí lze realizovat za pomoci tyristoru v kombinaci s diakem. Jedná se o jednoduchou, nicméně účinnou ochranu reproduktorů proti poškození stejnosměrným napětím. Výstup reproduktoru je připojen přes diak na zapalovací elektrodu tyristoru. Za normálního provozu, kdy je na výstupu zesilovače nulové stejnosměrné napětí (střídavá složka je odfiltrována kondenzátorem) je ochrana neaktivní. Jakmile se ale na výstupu objeví stejnosměrné napětí o velikosti zapalovacího (spínacího) napětí diaku dojde k sepnutí tyristoru. Ten v podstatě připojí výstup zesilovače k nulovému potenciálu. Při průrazu koncových tranzistorů tak dojde ke zkratování napájecího napětí a přepálení tavné pojistky v napájecích obvodech. Tím dojde k vyřazení přístroje z funkce.

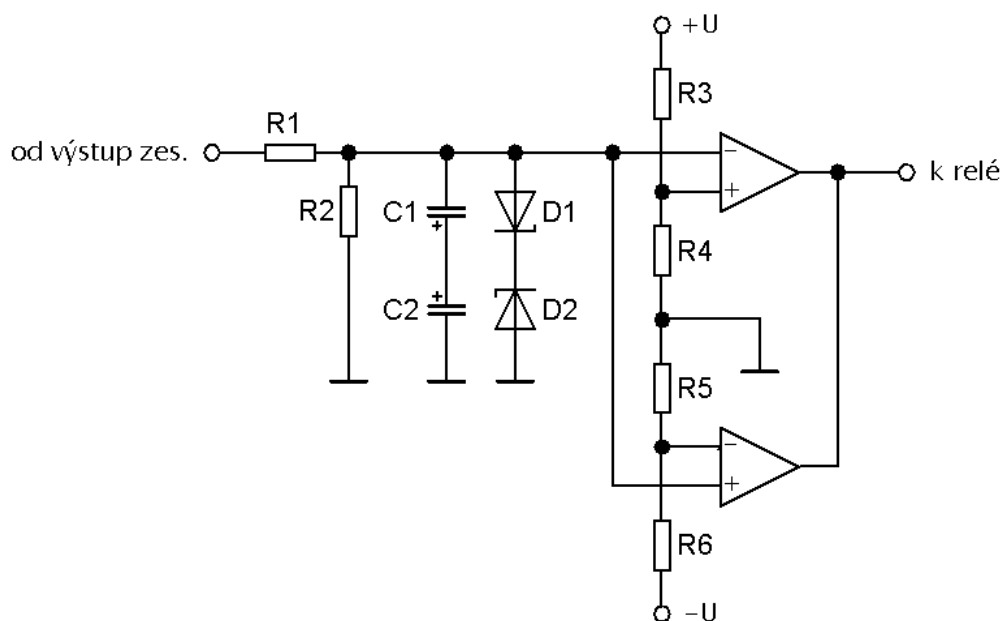
Jediným nedostatkem tohoto zapojení je skutečnost, že s úspěchem se dá použít pouze u zesilovačů jejichž napájecí napětí je vyšší, než zapalovací napětí diaku. [19] Nicméně se jedná o velmi účinnou a spolehlivou ochranu.



Obr. 16: Princip ochrany proti stejnosměrnému napětí na výstupu

Jinou možností je sledovat velikost stejnosměrného napětí na výstupu zesilovače znovu pomocí komparátoru, kde na jeden jeho vstup je přivedeno napětí referenční (např. z napěťového děliče připojeného k napájecímu napětí pomocných obvodů) a na druhý vstup je přivedeno napětí z výstupu zesilovače. To je třeba znovu ošetřit pomocí kondenzátorů k odfiltrování střídavé složky ze signálu, případně doplnit Zenerovými diodami, které zajišťují, že hodnota stejnosměrného napětí na vstupu komparátoru nepřekročí jimi předem nastavenou mez. Pokud zesilovač funguje správně, na jeho výstupu je prakticky nulové stejnosměrné napětí. Pokud se ale z nějakého důvodu na výstupu zesilovače objeví, dojde k překlopení komparátoru a aktivaci ochrany. [4]

Výhodou tohoto řešení je, že ochrana proti stejnosměrnému napětí se dá s úspěchem kombinovat s ochranou zpožděného přepínání reproduktorů a to např. tak, že výstup komparátoru se připojí na vstup obvodu pro spínání relé. V případě poruchy tak dojde k odpojení zátěže od výstupu zesilovače.



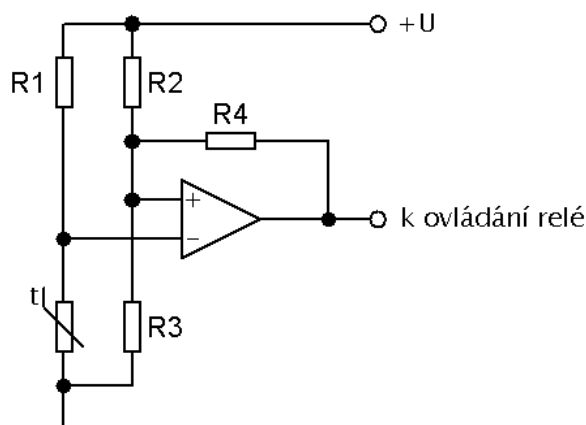
Obr. 17: Detekce stejnosměrného napětí

4.2.5 Tepelná ochrana

Zesilovače používané k ozvučování jsou poměrně často vystaveny extrémním podmínkám. Odevzdávají maximální výkon, pracují na hranici limitace, často bývá ztráta na koncových tranzistorech značná a nezřídka jsou umístěny zesilovače na místech, kde nemusí být zajištěno jejich chlazení v potřebné míře. Velice často se také umísťují do standardizovaného stojanu o rozměru 19“, tzv. racku, kde v podstatě jeden přístroj otepluje jiný a naopak. Je proto více než nutné zesilovače vybavit obvodem který monitoruje a vyhodnocuje okamžitou teplotu koncových tranzistorů a v případě nutnosti aktivuje tepelnou ochranu. Mnohdy se tepelné ochrany doplňují o obvody plynulého řízení otáček ventilátorů v závislosti na aktuální teplotě chladiče, resp. koncových tranzistorů. Permanentní otáčení ventilátoru i při provozu zesilovače v komorních podmínkách by totiž mohlo působit dost rušivě.

Nejjednodušší tepelná ochrana se dá realizovat pomocí spínacího, popř. rozpínacího termostatu. Ten se umístí na chladič v blízkosti koncových tranzistorů. V případě, že dojde k oteplení chladiče nad aktivační teplotu termostatu, dojde k jeho sepnutí, případně rozepnutí. Termostat může být připojen k výstupnímu obvodu ochran s relé, kde v případě přehřátí způsobí odpojení zátěže od výstupu zesilovače. Výhoda tohoto zapojení opět spočívá v jednoduchosti a relativní spolehlivosti, nevýhodou je skutečnost, že uživatel prakticky nemá možnost si aktivační teplotu nastavit.

Proto se daleko častěji využívají ke sledování teploty chladičů teplocitlivé součástky, především termistory. Jedná se o součástky, u kterých se při změně teploty mění jejich vnitřní odpor a změna odporu pak může být převedena na změnu napětí a dále zpracovávána např. komparátorem. Ten znovu porovnává velikosti dvou napětí, přičemž jedno je napětí referenční a druhé je napětí závislé na vnitřním odporu termistoru. Při dosažení kritické teploty se úbytek napětí na termistoru zvětší nebo zmenší (záleží na typu termistoru) natolik, že dojde k překlapaní komparátoru, tím pádem k aktivaci tepelné ochrany. Výstup komparátoru může být opět připojen k výstupnímu obvodu ochran s relé, kde v případě poruchy dojde k odpojení reproduktorů. Do komparačního obvodu s termistorem se zapojují navíc proměnné rezistory (trimry), aby bylo možné manuálně nastavit teplotu, při které dojde k aktivaci ochrany. Aby na hranici kritické teploty nedošlo k rozkmitání obvodu je u komparátoru vytvořena hystereze, která rovněž zajišťuje aby k deaktivaci tepelné ochrany došlo až při dostatečném poklesu teploty chladiče koncových tranzistorů.



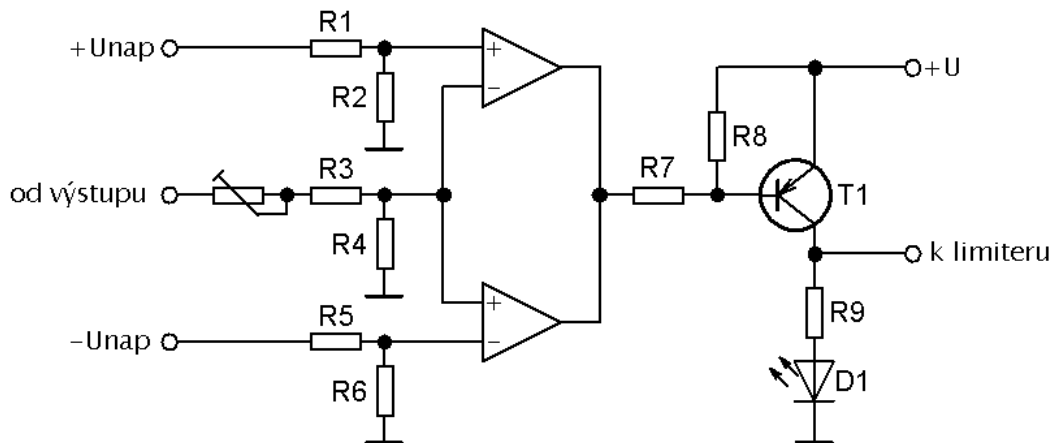
Obr. 18: Snímání teploty chladiče

Obvod pro řízení otáček ventilátorů používá totéž teplotní čidlo, jako tepelná ochrana. Změna napěťového úbytku na něm slouží k řízení tranzistoru ovládajícího ventilátor ofukující chladič koncových tranzistorů. S rostoucí teplotou dochází k otevírání tranzistoru a tím ke zvyšování otáček ventilátoru.

4.2.6 Detektor limitace

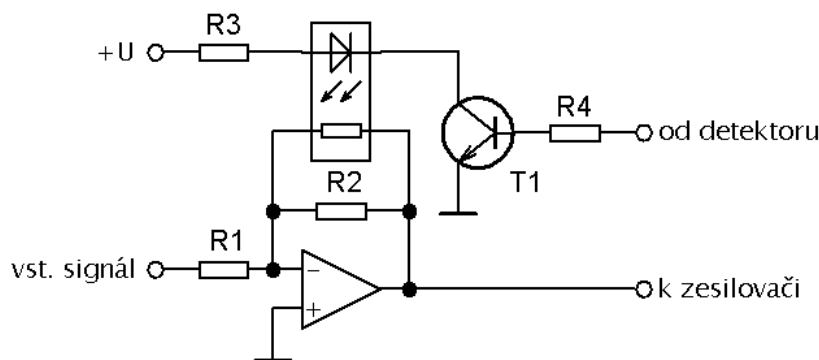
Pokud zesilovač odevzdává do zátěže maximální výkon a napětí na výstupu zesilovače se začíná přibližovat velikosti napětí napájecího, může při dalším zvyšování budícího signálu velmi rychle dojít k nárůstu zkreslení zesilovače vlivem limitace. Výstupní signál je silně omezován, což se projevuje, mnohdy až slyšitelným, zkreslením hudebního signálu zesilovačem zpracovávaného. Z harmonického sinusového signálu se v extrémním případě může stát signál podobající se signálu obdélníkovému. Tento stav je nebezpečný jak pro připojené reproduktory, tak pro koncové tranzistory. Je proto důležité, aby uživatel přístroje byl na tento stav včas upozorněn.

Detekce limitace v obvodu znázorněném na obr. 19 je založena na sledování okamžité velikosti napětí na výstupu zesilovače a porovnávání tohoto napětí s napájecím napětím koncového stupně. Napětí se porovnává opět pomocí komparátoru. V případě, že výstupní napětí dosahuje velikosti napájecího dojde k překlapaní komparátoru a následnému rozsvícení LED diody. Každý z komparátorů slouží pro detekci limitace kladné nebo záporné půlvlny výstupního signálu. Pro jemnější nastavení překlápěcí úrovně je vhodné doplnit vstupní napěťový dělič detektoru limitace o trimr.



Obr. 19: Princip detekce limitace

V praxi se detektory limitace, někdy také nazývány „limitery“, často doplňují o obvody řízení zisku. V případě, kdy se zesilovač blíží k hranici limitace, nedochází dále ke zvyšování budícího signálu a tím ke zvyšování zkreslení. Řízení zisku se provádí zpravidla napětím řízenými zesilovači (tzv. VCA obvody), popř. operačními zesilovači, v jejichž zpětné vazbě jsou zapojeny fotorezistory. Pomocí těchto optoelektrických prvků, resp. změny jejich odporu, dochází k požadované změně zesílení operačního zesilovače – velikosti budícího signálu. [1], [3], [5], [6]



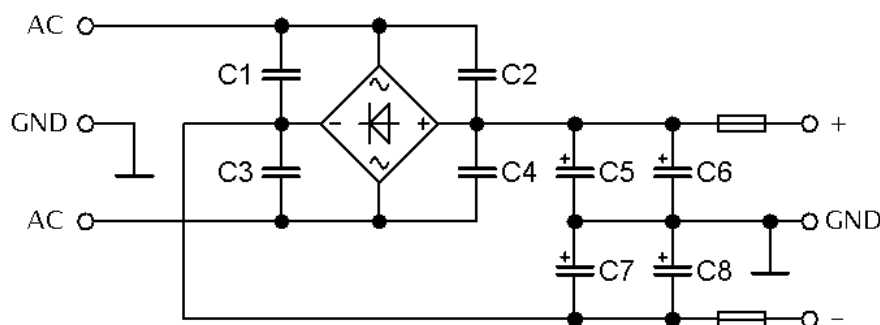
Obr. 20: Regulace zisku při limitaci zesilovače

5 NAPÁJECÍ ZDROJE ZESILOVAČŮ

Ačkoliv se to nezdá, napájecí zdroj nemalou měrou ovlivňuje výslednou kvalitu zesilovače a stává se mnohdy poměrně podceňovanou částí zařízení. Zvláště u velmi výkonných zesilovačů používaných například pro buzení basové sekce PA systémů bychom měli síťovému transformátoru a bloku filtračních kondenzátorů věnovat zvláštní pozornost. Je dobré si uvědomit, že právě v oblasti špiček je filtrační kapacita pro koncový stupeň nepostradatelná „zásobárna energie“. Doporučuje se, aby filtrační kapacita u výkonných zesilovačů neklesla pod $20.000\mu\text{F}$ na jednu větev napájecího zdroje.

Napájení koncových stupňů se řeší v zásadě dvěma způsoby, přičemž volba napájecího zdroje závisí především na konstrukci koncového zesilovače. Použije se buď klasický napájecí zdroj s jedním výstupním napětím (v takovém případě bývá koncový stupeň na výstupu opatřen kondenzátorem zajišťujícím oddělení stejnosměrné složky) a nebo častěji zdroj symetrického napětí s dvěma výstupními napětími. Takový zdroj je poněkud komplikovanější a vyžaduje ke své funkci síťový transformátor se dvěma sekundárními vinutími. Jeho použití je ale v oblasti audiotechniky mnohem vhodnější.

K jakémusi nepsanému pravidlu v oblasti konstruování nízkofrekvenčních zesilovačů patří použití toroidního síťového transformátoru. Jeho výhodou oproti klasickému transformátoru s jádrem skládaným z EI plechů je především skutečnost, že jeho magnetické rušení je nesrovnatelně menší. Rovněž tak hmotnost stejně výkonného toroidního transformátoru a transformátoru skládaného z EI plechů prakticky srovnávat nelze. U kvalitnějších zapojení zesilovačů mají síťové transformátory mezi primárním a sekundárním vinutím vloženou stínící folii, jejímž úkolem je zabránit pronikání nejrůznějších rušivých impulsů z rozvodné sítě do obvodů za sekundárním vinutím.



Obr. 21: Typické zapojení napájecího zdroje pro koncový zesilovač

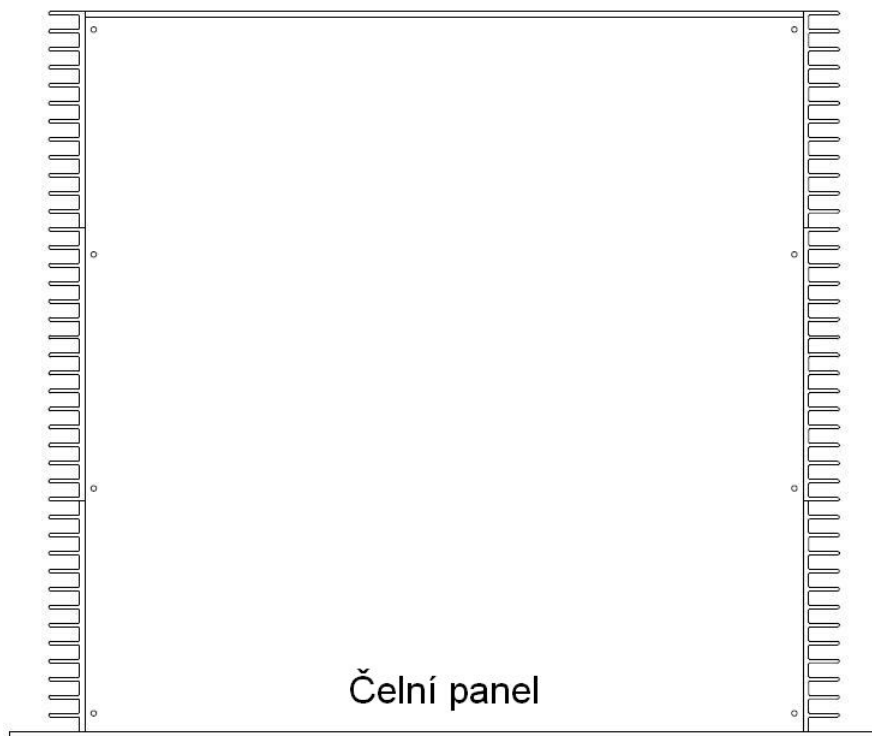
Koncepce symetrického zdroje je následující: za síťovým transformátorem následuje usměrňovač realizovaný buď diodovým můstkem nebo čtyřmi jednotlivými diodami do můstku zapojenými. Ke každé z diod se paralelně připojuje keramický kondenzátor o kapacitě cca 100nF, který zabraňuje pronikání rušivých složek, které by při usměrňování střídavého napětí mohly vznikat. Usměrněné napětí se přivádí na blok filtračních kondenzátorů, jejich úkolem je co nejúčinněji eliminovat zvlnění výstupního napětí. Střed sekundárního vinutí se připojuje na společný zemnicí bod. Toto by mělo být jediné společné místo, kde se všechny země spojí s kovovou kostrou skřínky zesilovače. Nedodržení této zásady s sebou může přinést poměrně těžce odstranitelné komplikace spojené s brumem. Napájecí zdroj se velmi často doplňuje o tavné trubičkové pojistky, které mají za úkol, v případě poruchy, ochránit elektronické obvody uvnitř přístroje. Mnohdy se ale tyto pojistky umísťují až na desku koncového stupně pro pravý a levý kanál zesilovače, aby v případě poruchy pouze v jednom kanále nebyl z funkce vyřazen celý přístroj.

6 MECHANICKÁ KONSTRUKCE ZESILOVAČŮ

Zesilovače používané pro ozvučovací účely se nejčastěji umísťují do standardizovaných skříní o šířce 19“ nazývaných RACK. Tyto skříně se vyrábí v nejrůznějších výškách, kde základní výšková jednotka 1U má velikost 44mm. Pro zesilovače je pak nejpoužívanější skříní skříň o výšce 2U, výjimkou ale nejsou skříně o velikosti i 4U. Umístění zesilovače do RACKU s sebou nese jisté výhody. V ozvučovací praxi se používají dnes vícepásmové systémy, přičemž každé pásmo je buzeno samostatným zesilovačem. Zde se nabízí možnost umístit zesilovače pro všechna pásma do jednoho RACKU, kde se propojí např. se zvukovým procesorem nebo aktivní výhybkou. Díky takovému uspořádání odpadá při každé hudební produkci nutnost opakovaného propojování přístrojů. RACK navíc usnadňuje i častý transport přístrojů.

Uspořádání a umístění modulů uvnitř přístroje je možné taky několika způsoby, které se odvíjí především od volby chlazení koncového stupně. Jednou možností je použít chladič koncových tranzistorů zároveň jako boční stěnu přístroje, kdy na každou bočnici se umístí jeden kanál zesilovače. Předností této koncepce je především ušetření prostoru ve skříní, který by jinak zabíral poměrně masivní chladičový profil. Nicméně tento způsob chlazení je konstrukčně značně náročný vzhledem k tomu, že chladiče o přesně daných rozměrech, které

by tak zastaly i funkci bočnice skříně o rozměru 19“ se standardně nedodávají. Navíc je prakticky nemožné použít u takto koncipovaného zesilovače aktivního chlazení, které přístroje zvláště vyšších výkonů vyžadují. Tato skutečnost do značné míry ovlivňuje maximální výstupní výkon zesilovače. Objevuje se proto tento způsob hlazení především u zesilovačů umístěných do atypických skříní hlavně v oblasti hifi audiotechniky.



Obr. 22: Přístrojová skříň s chladiči tvořícími boční stěny skříně

Jiným, v oblasti profesionálního ozvučování, daleko častějším způsobem rozmístění modulů je takový způsob, kdy se dva podélně žebrované chladiče umísťují žebrováním k boční stěně přístroje a tvoří tak chladicí tunel. Tento tunel je pak na jedné nebo obou stranách zakončen ventilátory, které vhání chladicí vzduch do tunelu. Čelní panel přístroje je zpravidla opatřen větracími otvory, kterými je chladicí vzduch pomocí ventilátoru nasáván a vyfukován je zadní částí přístroje. Z vnější anebo horní a dolní stany tunelu (záleží na konstrukci desky zesilovače) se pak umísťují výkonové tranzistory koncového stupně. Uprostřed skříně vzniká prostor vhodný pro umístění toroidního transformátoru, napájecího zdroje, případně dalších pomocných obvodů. Toto uspořádání je výhodné i z hlediska symetrického rozložení hmotnosti zesilovače.

Chladicí tunel je možné řešit i složením dvou podélně žebrovaných profilů žebrováním k sobě. Vznikne tak chladicí tunel se dvěma rovnými bočními stěnami na které je možné umístit výkonové tranzistory. Tunel jako takový se dá umístit v kterékoliv části skříně. Za výhodu by se dalo považovat to, že k chlazení dvoukanálového zesilovače stačí jeden chladicí tunel, ve většině případů, ale pak není zpravidla možné dosáhnout symetrického umístění komponentů uvnitř přístroje.

Možností mechanického provedení a způsobů rozložení modulů v zařízení je mnoho. Některé jsou konstruovány tak, že chladicí vzduch je v případě aktivního chlazení nasáván např. z boků nebo horního dílu přístrojové skříně a vyfukován zadním panelem. Takové řešení

ale není, vzhledem k budoucího umístění zesilovače např. v již zmíněné skříni RACK, z hlediska chlazení úplně optimální.

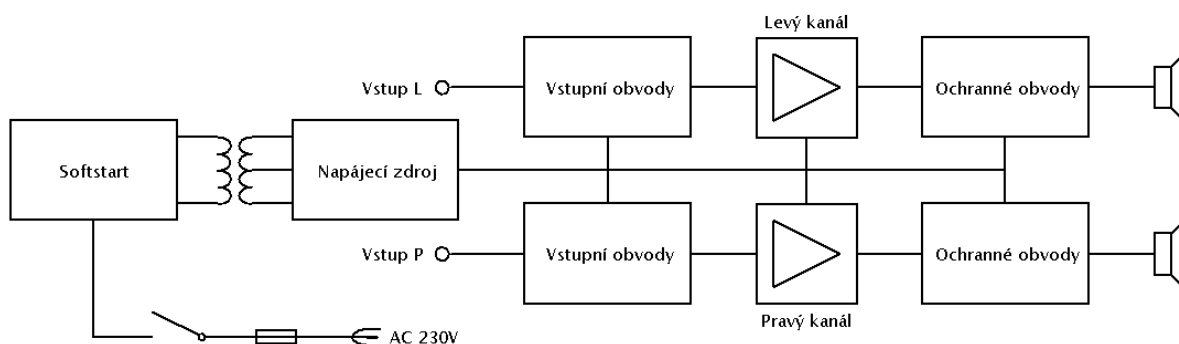
7 ZESILOVAČ S INTEGROVANÝM BUDIČEM LME49810

Mým úkolem bylo navrhnout koncepci výkonového stereofonního zesilovače pro ozvučovací účely využívajícího moderní integrovaný budič LM4702 nebo LME49810. Tento koncový zesilovač by pak měl být umístěn ve stávající skříni staršího zesilovače. Velikost skříně je cca 19“ a výška 3U (jedná se o atypickou skříň s rozměry neodpovídající standardu 19“ velikosti přístrojů). Tím se rozsah mé práce omezuje na elektrický návrh řešení s mírnými mechanickými úpravami původní skříně.

Rozhodl jsem se koncipovat zesilovač jako dvojici samostatných bloků (tvz. „dual mono“) na dvou samostatných deskách, kde každá deska obsahuje jak samostatný výkonový stupeň, tak veškeré pomocné obvody – obvody ochran, doplňkový napájecí zdroj pro napájení operačních zesilovačů, atd. Oba moduly využívají společný napájecí zdroj s jedním toroidním transformátorem. Ten byl rovněž součástí původního zesilovače. Následná kompletace a mechanická realizace by tak mohla být méně náročná, než při použití jednodeskového stereo-zesilovače. Hlavně možnost umístění desek na samostatné chladiče je v tomto případě nespornou výhodou, která pak zjednodušuje mechanickou konstrukci.

K tomuto účelu je vhodnější použití obvodu LME49810, jedná se totiž o jeden samostatný budič koncových tranzistorů. Obvod LM4709 má sice podobné vlastnosti ale je řešen jako dvojitý, což, jak z výše popsanych důvodů, není pro tento účel zcela optimální. Obvod LME49810 navíc dovoluje použití vyššího napájecího napětí, což umožňuje dosahovat vyšších výstupních výkonů.

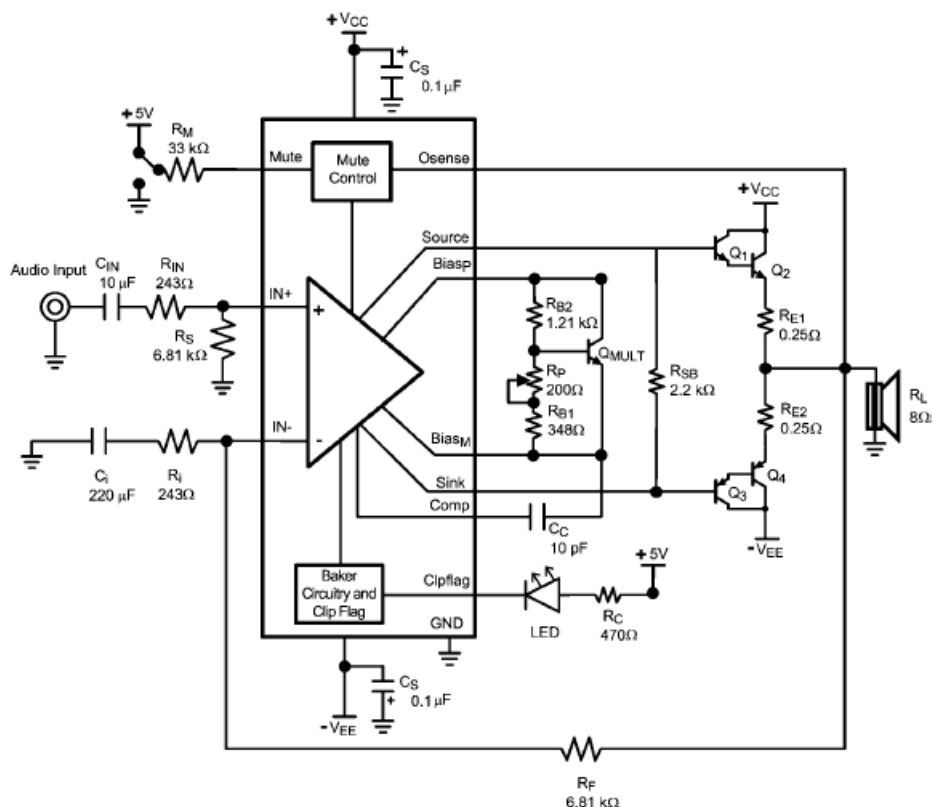
Pohled na celkové modulové uspořádání zesilovače ukazuje následující blokové schéma.



Obr. 23: Blokové schéma zesilovače s obvodem LME49810

7.1 Koncový stupeň

Dalo by se říci, že jakýmsi „srdcem“ celého zesilovače je právě integrovaný budič koncových tranzistorů – obvod LME49810. Zapojení koncového stupně vychází z doporučeného zapojení výrobce podle obr. 24.



Obr. 24: Doporučené zapojení obvodu LME49810

Vstupní symetrický signál je přiveden do vstupního zesilovače zapojeného jako diferenční (rozdílový) zesilovač, jehož úkolem je převést signál na nesymetrický. Jak již z názvu zapojení zesilovače vyplývá, jedná se o zesilovač, který porovnává dva signály a zesiluje rozdíl jejich velikostí. Má-li diferenční zesilovač skutečně zesilovat jen rozdílové napětí, musí se dodržet následující podmínka: [12]

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R5} \quad (7.1)$$

To znamená, že dvojice rezistorů R1 a R2 musí být ve stejném poměru jako rezistory R3 a R5. Celkové zesílení obvodu je pak dáno vztahem:

$$A_U = \frac{R5}{R2} \quad [-] \quad (7.2)$$

Po úpravě dostaneme vztah pro výpočet výstupního napětí:

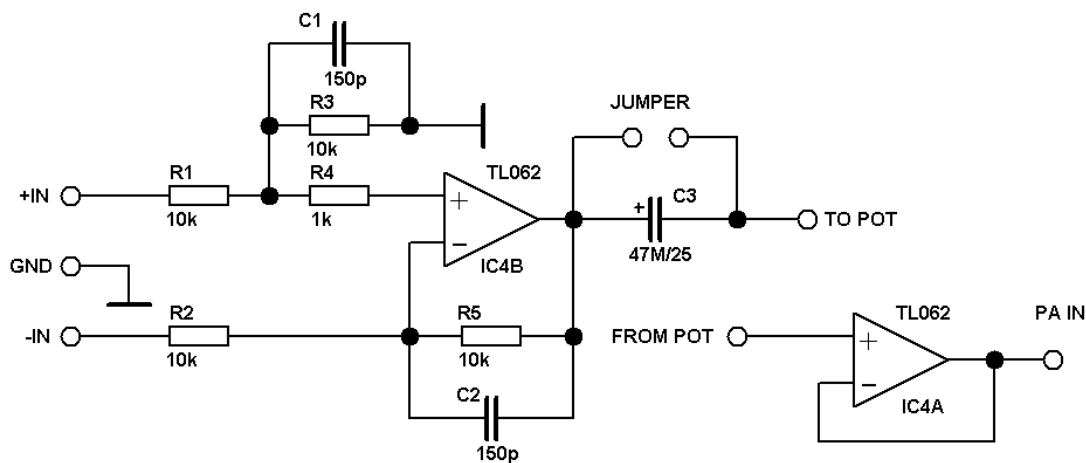
$$U_{OUT} = \frac{R5}{R2} \cdot (U2 - U1) = 1 \cdot (U2 - U1) \quad [V] \quad (7.3)$$

kde U_{OUT} je výstupní napětí, $U2$ je napětí vstupující do neinvertujícího vstupu a $U1$ do vstupu invertujícího. Po dosazení konkrétních hodnot rezistorů bude vztah vypadat následovně:

$$U_{OUT} = \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot (U2 - U1) = 1 \cdot (U2 - U1) \quad [V] \quad (7.4)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že na velikost zesílení diferenčního zesilovače mají vliv pouze rezistory $R5$ a $R2$, resp. jejich poměr. Celkové zesílení vstupního obvodu je tedy nastaveno na hodnotu 1.

Na výstupu diferenčního zesilovače je zapojen kondenzátor pro oddělení stejnosměrné složky ze signálu. Celkový zesilovač je ale stejnosměrně vázaný - kondenzátor je standardně zkratován pomocí kontaktu JUMPER. Vstupní zesilovač a jeho zapojení ukazuje obr. 25. [8], [12]



Obr. 25: Schéma zapojení vstupního symetrického zesilovače

Ze vstupního zesilovače je signál přiveden na potenciometr pro ovládání hlasitosti. Ten je umístěn na předním panelu zesilovače. Na schématu ale tento není zakreslen. Potenciometr je zapojen jako napěťový dělič. Jeho hodnota je $10k\Omega$ při logaritmickém průběhu odporové dráhy. Logaritmický potenciometr je použit z důvodu lepšího přizpůsobení se lidskému slyšení, které je v oblasti nižších hladin hlasitosti na změnu citlivější, než při hladinách vysokých. Z běžce potenciometru je signál přiveden dále na druhou část operačního zesilovače TL062 zapojenou jako sledovač. Tento obvod pouze odděluje regulátor hlasitosti od vstupu samotného budiče LME49810.

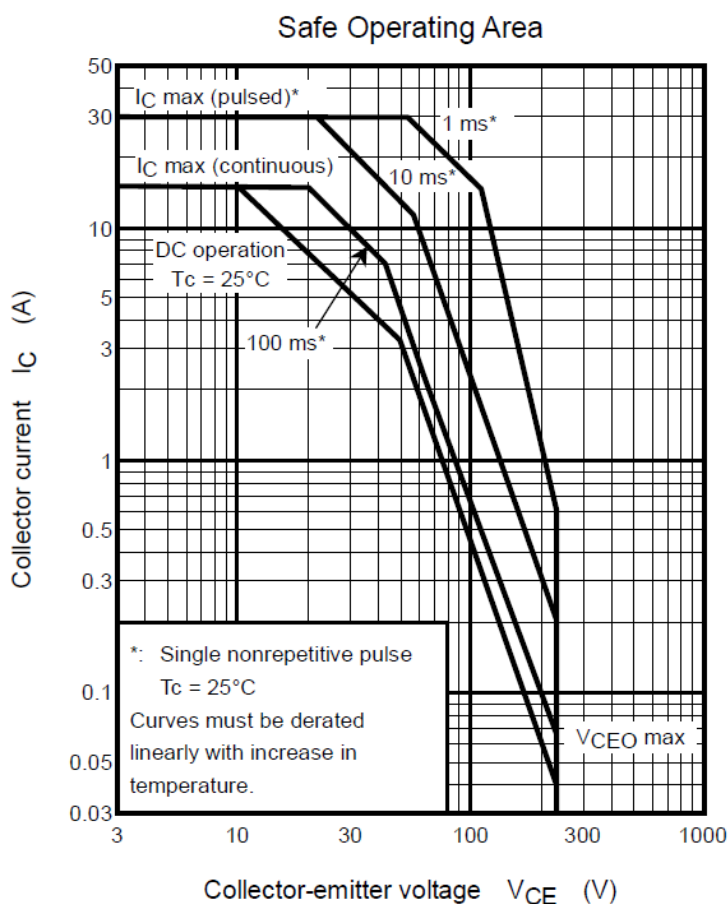
Odporovým děličem připojeným do invertujícího vstupu je nastaveno zesílení celého obvodu. Je dáno vztahem: [5], [12]

$$A_U = 1 + \frac{R48}{R45} \quad [-] \quad (7.5)$$

Po dosazení:

$$A_U = 1 + \frac{R_{48}}{R_{45}} = 1 + \frac{47 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = 48 \quad [-] \quad (7.6)$$

Výstup budiče je pak přiveden přímo na koncové tranzistory. Přestože obvod je schopen podle údajů výrobce dodat poměrně vysoký budící proud (typicky 60mA), je pro „posílení jeho výstupu“ obvod doplněn budícími tranzistory T4 a T5. Komplementární pár 2SC4793/2SA1837 pak budí přímo komplementární dvojice koncových tranzistorů 2SC5200/2SA1943. Tyto tranzistory od japonského výrobce Toshiba se běžně objevují i v profesionálních koncových zesilovačích, navíc jejich cena je relativně příznivá, jsou proto použity i v tomto zesilovači. Jejich počet ve výstupní části zesilovače společně s velikostí napájecího napětí mají zásadní vliv na velikost výstupního výkonu. Protože podle zadání by měl zesilovač dosáhnout výkonu 400W na zátěži 8Ω, bylo nutné zvážit, kolik tranzistorů bude koncový stupeň obsahovat. Z hlediska spolehlivosti provozu (s ohledem na dodržení bezpečné pracovní oblasti tranzistorů – SOA, viz obr. 26) by na tomto místě platilo pravidlo „čím více, tím lépe“. S každým dalším tranzistorem by se ale zákonitě rozměrově zvětšila i deska s plošnými spoji.



Obr. 26: SOA charakteristika tranzistorů 2SC5200 a 2SA1943 od firmy Toshiba

Bylo tedy nutné počet koncových tranzistorů určit i s ohledem na tuto skutečnost. Budeme tedy uvažovat špičkový proud tekoucí do zátěže. Ten je určen napájecím napětím U_{NAP} a minimální připojenou zátěží R_{MIN} a je dán vztahem:

$$I_{MAX} = \frac{U_{NAP}}{R_{MIN}} \quad [A] \quad (7.7)$$

Mějme tedy napájecí napětí $U_{NAP}=50V$ a minimální velikost zátěže $R_{MIN}=4\Omega$. Maximální proud zátěží tak v tomto případě bude, podle výše uvedeného vztahu, $I_{MAX}=12,5A$. Velikost proudu bude omezena například tavnou pojistkou. Okamžitý výkon na koncových tranzistorech v případě zkratu na výstupu, kdy na koncových tranzistorech je plné napájecí napětí, je tak dán součinem špičkového proudu protékajícím obvodem kolektoru a okamžitého napětí U_{CE} , kterému v tomto případě odpovídá napětí napájecí. Velikost ztrátového výkonu pak bude:

$$P_{MAX} = U_{NAP} \cdot I_{MAX} \quad [W] \quad (7.8)$$

Po dosazení hodnot dospějeme k hodnotě $P_{MAX}=625W$. Povolená kolektorová výkonová ztráta na jednom tranzistoru 2SC5200/2SA1943 je podle katalogových údajů výrobce $P_C=150W$ (viz. SOA charakteristika na obrázku výše). Pokud bychom tedy chtěli beze zbytku ztrátový výkon rozložit na koncových tranzistorech, museli bychom použít asi čtyři až pět párů komplementárních tranzistorů.

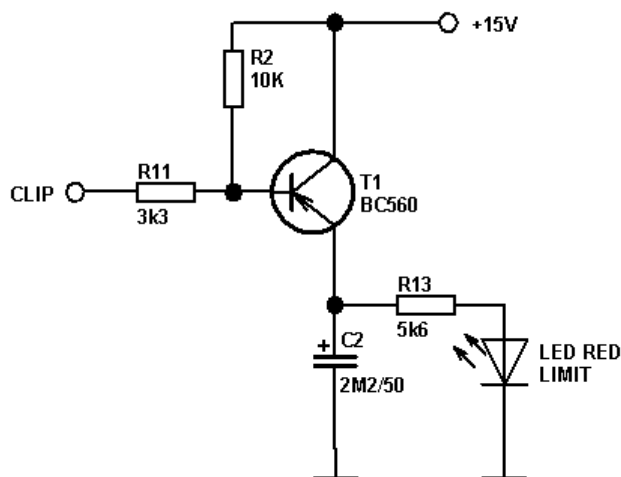
V běžném provozu se ale zesilovač do takovéto mezní situace, kdy by při maximální proudu bylo na tranzistoru plné napájecí napětí, nedostane. Navíc je vybaven elektronickou pojistkou proti proudovému (a tedy i výkonovému) přetížení, která zohledňuje velikost napětí U_{CE} koncových tranzistorů a hlídá tak bezpečnou pracovní oblast tranzistorů. Je tedy koncový stupeň osazen třemi páry výkonových tranzistorů, což by mělo ke spolehlivému provozu stačit.

Rezistory zapojené v jejich emitorových obvodech mají za úkol eliminovat případné malé nestejnosti jednotlivých kusů tranzistorů. Jejich hodnota bývá malá, maximálně jednotky Ω . V tomto případě je hodnota rezistoru $0,47\Omega$. Protože do zátěže teče značný proud, vzniká na rezistoru značná ztráta. Je proto tento rezistor dimenzován na výkon $3W$. Emitorové rezistory slouží zároveň jako senzor pro výše zmíněnou nadproudovou pojistku. Ta vyhodnocuje okamžitý úbytek napětí na rezistorech vyvolaný průchodem proudu do zátěže zesilovače. Pojistku tvoří tranzistory T6 a T7 (BC546 a BC556) v kombinaci s příslušnými rezistory. Pro kladnou větev zesilovače jsou to rezistory R56, R57, R60, pro zápornou větev R58, R59, R52). V některých zapojeních se jednoduché proudové pojistky nastavují na maximální proud zátěží. Při zkratu na výstupu zesilovače pak dochází k výkonovému přetěžování koncových tranzistorů. Pojistka je v tomto případě řešena složitějším způsobem, kdy se pomocí odporového děliče s rezistory R56/R57, resp. R58/R59 zavádí do obvodu proudové pojistky část napětí U_{CE} koncových tranzistorů. V případě zkratu na výstupu, kdy je na tranzistoru napětí U_{CE} vysoké je tak pojistka citlivější a reaguje již při nižších hodnotách výstupního proudu (k otevření tranzistoru T6 resp. T7 postačí menší úbytek na emitorovém rezistoru). Naopak při plném rozkmitu výstupního signálu, kdy je napětí U_{CE} koncových tranzistorů malé, je třeba k aktivaci pojistky daleko vyšší výstupní proud. V případě aktivace pojistky dojde k otevření tranzistoru T6 nebo T7 (záleží na tom, ve které větvi zesilovače dojde k překročení maximálního nastaveného proudu), průchod proudu způsobí rozsvícení

LED diody v optočlenu a následné otevření optotranzistoru. Ten je spojen s obvodem řídicím spínání výstupního relé. V případě poruchy tak dojde k odpojení připojené zátěže a aktivaci funkce MUTE. Citlivost pojistky je možné nastavit pomocí trimrů. O druhé části proudové pojistky bude pojednáno v kapitole 7.2.

LED diody optočlenů v obvodu proudové pojistky mají vlastní napájecí zdroj vztažený k výstupu zesilovače. Pokud je hodnota výstupního napětí minimálně 10V pod hodnotou napětí napájecího, protéká přes diody D17 a D19 a rezistory R37 a R44 proud nabíjející kondenzátory C19 a C21. Velikost napětí na kondenzátorech je omezena zapojením Zenerových diod s napětím 10V. Při signálových špičkách, kdy je hodnota výstupního napětí blízká napětí napájecímu, zabráňují diody D17 a D19 zpětnému vybití kondenzátorů C19 a C21. Z nich se pak v případě aktivace proudové pojistky odebírá energie k rozsvícení LED diod optočlenů.

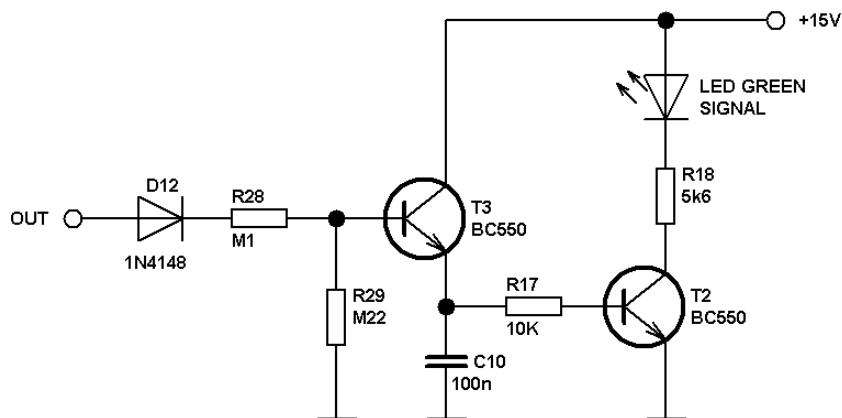
Značné usnadnění při návrhu ochranného obvodu přináší detektor limitace výstupního signálu integrován přímo v obvodu LME49810. Výstup detektoru je vyveden na pin č.1, odkud může být odebírán signál pro další zpracování. Výrobce doporučuje připojit k tomuto výstupu přes omezovací rezistor LED diodu k napětí +5V. Protože obvod pro detekci limitace je aktivní pouze v okamžiku limitace, jsou krátké okamžiky přebuzení špatně patrné. Je proto k výstupu detektoru připojen jednoduchý obvod s tranzistorem a kondenzátorem, který umožní vizuálně zaznamenat i signálové špičky. Do báze tranzistoru T1 je pomocí rezistoru R12 zavedeno kladné napětí. Protože se jedná o tranzistor typu PNP je v tomto okamžiku zavřený. V případě, že výstup CLIP je aktivní, dojde ke snížení napětí U_{BE} tranzistoru T1 a jemu následnému otevření. Tranzistor je připojen k napětí +15V, začne se tedy nabíjet kondenzátor C2, prakticky na celé napětí +15V. Následně dochází k jeho vybíjení přes omezovací rezistor R13 a připojenou LED diodu. Právě díky vybíjení kondenzátoru dojde k prodloužení svitu LED diody. Zapojení obvodu ukazuje obr. 27. [3], [5]



Obr. 27: Schéma zapojení indikátoru limitace

Na podobném principu, jako indikátor limitace funguje indikátor přítomnosti signálu. Výstupní signál za kontaktem relé je přiveden přes diodu D12, která střídavý výstupní signál usměrní. Kvůli jednoduchosti obvodu je tak signalizována pouze kladná hodnota signálu. Pro účely indikace je toto řešení však postačující. Usměrněný signál dále pokračuje k napětíovému děliči, který tvoří rezistory R28 a R29. Tento dělič snižuje hodnotu výstupního napětí asi na

2/3. Pokud úbytek na rezistoru R29 dosáhne dostatečně velké hodnoty, tedy asi 0,65V, dojde k otevření tranzistoru T3. Průchod proudu způsobí nabíjení kondenzátoru C10. Napětí na tomto kondenzátoru je přivedeno přes rezistor R17 na bázi tranzistoru T2. Pokud napětí na bázi tranzistoru dosáhne opět hodnoty asi 0,65V otevře se tranzistor T2 a přes omezovací rezistor R18 začne LED diodou protékat proud – dojde k jejímu rozsvícení. Velikost výstupního napětí, při kterém dojde k indikaci přítomnosti signálu je závislá na poměru rezistorů R28 a R29. Změnou jejich hodnot je možné dosáhnout změny prahu indikace. Zapojení indikátoru přítomnosti signálu ukazuje obr. 28.



Obr. 28: Schéma zapojení indikátoru signálu

Obvod LME49810 je vybaven i obvodem teplotní kompenzace klidového proudu. Zapojení vychází z doporučení výrobce. Kompenzaci zajišťuje tranzistor T10, který je umístěn v těsné blízkosti koncových tranzistorů tak, aby jeho teplota byla co možná nevíce shodná s teplotou koncových tranzistorů. Nastavení klidového proudu je možné provádět pomocí rezistorového trimru P2. Klidový proud se po zahřátí zesilovače na provozní teplotu může změnit. Je proto dobré klidový proud „donastavit“ právě po zahřátí koncových tranzistorů.

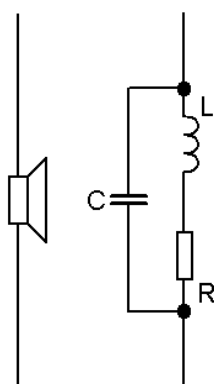
Pro udržení co možná nejmenšího stejnosměrného napětí na výstupu zesilovače vybavují i profesionální výrobci své přístroje obvodem nazývaným DC servo. Jedná se o obvod s operačním zesilovačem zapojeným jako integrátor s dostatečně dlouhou časovou konstantou danou jednak kapacitou kondenzátoru C13 a jednak velikostí rezistoru R30. Časová konstanta je dána vztahem: [12]

$$\tau = R \cdot C \quad [\text{s}] \quad (7.9)$$

Výstupní signál je připojen na vstup operačního zesilovače IC3. Velikost vstupního napětí je omezena dvojicí antiparalelně zapojených diod D13 a D14 na velikost asi 0,65V. Střídavé napětí je ze signálu kondenzátorem C14 a pokud se na výstupu zesilovače objeví stejnosměrná složka, výstup integrátoru, který je připojen na vstup zesilovače se změní přesně v opačné polaritě a nenulové napětí na výstupu zesilovače kompenzuje. V obvodu DC serva je osazen operační zesilovač TL062, jehož vstupní offset je typicky $V_{IO}=3\text{mV}$. Může se proto na výstupu zesilovače objevit právě toto stejnosměrné napětí. Hodnota 3mV je však naprosto zanedbatelná. [1]

DC servo udržuje na výstupu zesilovače nulové stejnosměrné napětí a umožňuje tak odstranit ze signálové cesty všechny vazební kapacity, což dále přispívá k velmi nízkým hodnotám harmonického zkreslení THD+N. Celý zesilovač je tedy stejnosměrně vázán. V případě výskytu většího stejnosměrného napětí na vstupu zesilovače je vhodné mezi vstupní zesilovač a vstup koncového stupně zařadit oddělovací kondenzátor. Zesilovač tak je stejnosměrně oddělen.

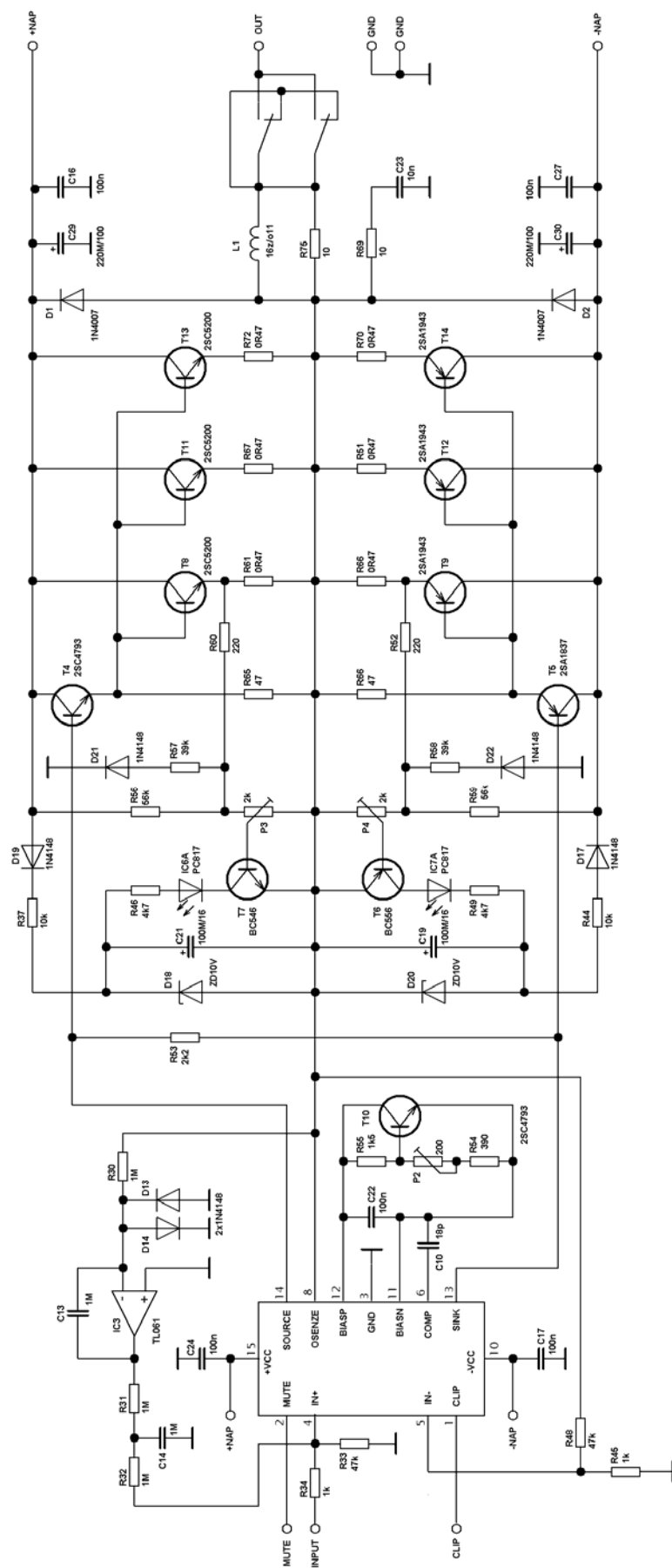
Výstup zesilovače je standardně ošetřen proti indukční zátěži závěrně polarizovanou dvojicí diod zapojenou mezi výstup zesilovače a příslušnou větev napájecího napětí. Tyto diody zároveň slouží jako jednoduchá ochrana zesilovače proti přepólování napájecího napětí, např. při ožiování zesilovače. V případě, že by došlo k záměně pólů napájecího napětí, budou obě diody pólovány v propustném směru a dojde k „tvrdému“ zkratu napájení. Tento zkrat pak vyvolá nekontrolovatelný odběr ze zdroje a např. přepálení tavné trubičkové pojistky, popř. aktivaci proudové ochrany laboratorního zdroje.



Obr. 29: Náhradní schéma reproduktoru

Dále je výstup opatřen Boucherotovým RC členem, jehož úkolem je kompenzovat komplexní charakter zátěže (reproduktoru) a zajistit tak kmitočtovou stabilitu zesilovače. Reprodukter (jeho náhradní schéma ukazuje obr. 27) vykazuje výrazný induktivní charakter a výsledná impedance rychle roste se zvyšujícím se kmitočtem. Na horním okraji akustického pásma by tak mohla být impedance dostatečně vysoká pro vznik oscilací. Boucherotův člen je kmitočtově závislý odpor, který impedanci na vysokých kmitočtech tlumí tak, aby byla přibližně konstantní. V tomto případě jej tvoří kondenzátor C23 spolu s rezistorem R69. Naproti tomu výstupní tlumivka L1 spolu s rezistorem R75 omezuje podobným způsobem vliv kapacitní zátěže.

Schéma zapojení koncového stupně je uvedeno na obr. 28.



Obr. 30: Schéma zapojení koncového zesilovače s obvodem LME49810

7.2 Ochranné obvody

Aby bylo zesilovač „plnohodnotný“ je důležité, aby byl vybaven obvodem, který by v případě jakékoliv poruchy nebo nestandardního provozního stavu uchránil před poškozením jak samotný zesilovač, tak připojené reproduktory. Zvláště pokud je zesilovač nasazen v oblasti profesionálního ozvučování, bývá dost často vystavován nepříznivým vlivům. Cena připojených reprosoustav určených pro profesionální nasazení je značná a jejich porucha by se tak mohla stát ne zrovna levnou záležitostí. Je tedy na místě zesilovač vybavit ochranným obvodem.

Obvody ochran koncového stupně zajišťují zpožděné připojení zátěže k výstupu zesilovače při zapnutí přístroje, ochranu připojených reproduktorů proti stejnosměrnému napětí, nadproudovou pojistku a tepelnou ochranu. Aktivace všech ochran je spojena s funkcí MUTE obvodu LME49810. To s sebou přináší tu výhodu, že rozpojování a spínání kontaktů relé probíhá bez buzení koncového stupně. Nemůže tak nastat případ, že by vlivem spínání nebo rozpínání velkého výkonu mohlo dojít na kontaktech relé ke vzniku oblouku a jejich následnému „slepení“. Takto poškozené relé totiž zcela degraduje funkci ochran, protože při jakékoliv poruše zůstane zátěž k výstupu zesilovače připojena.

Ochranu proti stejnosměrnému napětí na výstupu zajišťuje obvod s operačním zesilovačem IC1A zapojeným jako dvoucestný usměrňovač. Signál z výstupu zesilovače je přes omezovací rezistor přiveden na dvojici antiparalelně zapojených kondenzátorů C1 a C3 jejichž úkolem je ze signálu odstranit střídavou složku. Výstupní napětí je dále Zenerovými diodami D4 a D5 omezeno na hodnotu 12V. Protože, jak už bylo zmíněno, je operační zesilovač zapojen jako dvoucestný usměrňovač, vyvolá kladné i záporné napětí na jeho vstupu kladné napětí na výstupu. Výstup usměrňovače je připojen na vstup dalšího operačního zesilovače zapojeného jako komparátor. Ten tvoří hlavní část ochranného obvodu – ovládání relé i vstupu MUTE budiče LME49810. Do jeho invertujícího vstupu je zavedeno napětí, které je dáno odporovým děličem R15/R16. Hodnota napětí na invertujícím vstupu U_{inv} (pokud není na výstupu zesilovače stejnosměrné napětí) je tedy dána vztahem:

$$U_{inv} = \frac{R16}{R15 + R16} \cdot U_{NAP} \quad [V] \quad (7.10)$$

U_{NAP} je kladné napájecí napětí pro operační zesilovače – v tomto případě má hodnotu +15V. Napětí na neinvertujícím vstupu tak má podle hodnot rezistorů velikost asi 3V. Komparátor s obvodem IC1D porovnává toto napětí s napětím na jeho neinvertujícím vstupu, které je dáno napěťovým úbytkem na rezistoru R27. Za normálních podmínek je výstup komparátoru s obvodem IC1C na vysoké úrovni, tedy na hodnotě asi 14V. Napětí na rezistoru R27 je pak dáno následujícím vztahem:

$$U_{R27} = \frac{R27}{R25 + R26 + R27} \cdot 14 \quad [V] \quad (7.11)$$

Hodnota napětí na rezistoru R27 a tedy i na neinvertujícím vstupu komparátoru IC1D je asi 4,6V. Jeho výstup je tedy na vysoké úrovni. Přes propustně pólovanou diodu D10 se tak rychle nabije kondenzátor C9, jehož napětí sleduje neinvertující vstup IC2B zapojený jako sledovač. Kladné napětí na jeho výstupu se přes diodu D16 a rezistor R38 dostane na bázi tranzistoru T16 a způsobí jeho otevření. V obvodu kolektoru tranzistoru je zapojena cívka

relé, již při otevření tranzistoru začne procházet proud – dojde k sepnutí kontaktů relé a připojení zátěže k výstupu zesilovače.

Výstup komparátoru s obvodem IC1D slouží zároveň k ovládání vstupu MUTE integrovaného budiče. Narozdíl od kondenzátoru C9, kde se kladné napětí objeví ihned, kondenzátor C8 je díky závěrně pólované diodě D9 nabíjen pomaleji přes rezistor R19. Na výstupu sledovače s obvodem IC2A se kladné napětí objeví později než na výstupu IC2B a dojde tak aktivaci zesilovače až po sepnutí kontaktů relé. K aktivaci zesilovače je třeba, aby do vstupu MUTE tekla, podle údajů výrobce, proud asi 100μA. Ten do tohoto vstupu teče přes propustně pólovanou diodu D15 a rezistor R40.

V případě odpojování zátěže od výstupu zesilovače je proces přesně opačný. Pokud se výstup komparátoru IC1D dostane do nízké úrovně, dojde díky propustně polarizované diodě k okamžitému vybití kondenzátoru C8, poklesu napětí na výstupu IC2A a aktivaci obvodu MUTE. Naproti tomu kondenzátor se při poklesu napětí na výstupu IC1D začne díky závěrně pólované diodě D10 vybíjet přes rezistor R20 pomaleji. K odpadnutí kotvy relé tak dojde až po odpojení buzení koncového stupně.

Přestože napájecí proud relé není nijak vysoký (jeho hodnota se pohybuje kolem 30mA), napájení ze zdroje pro operační zesilovače by znamenalo jeho zbytečné nerovnoměrné zatížení. Napájení pro cívku relé je proto odvozeno z kladné napájecí větve výkonové části zesilovače. Protože hodnota tohoto napětí je ale poměrně vysoká a omezovací rezistor by tak musel být dimenzován na velmi vysoký ztrátový výkon (to by mimo jiné znamenalo i jeho nemalé rozměry), je napájení relé řešeno použitím proudového zdroje s tranzistorem T15. Ten má v obvodu báze zapojen sledovací rezistor jímž protéká proud relé. Jeho hodnota se podle níže uvedeného vztahu stanoví tak, aby při jmenovitém proudu relé na něm vznikala úbytek asi 0,65V.

$$R_{74} = \frac{U_{BE}}{I_{RE}} \quad [\Omega] \quad (7.12)$$

Napětí U_{BE} odpovídá hodnota 0,65V a jmenovitý proud použitého typu relé je $I_{RE}=30 \cdot 10^{-3}A$. Hodnota rezistoru R74 je tak asi 22Ω.

V případě, že by se na výstupu zesilovače objevilo stejnosměrné napětí a jeho hodnota by byla vyšší, než asi 1,6V (tato hodnota je dána rozdílem napětí mezi neinvertujícím vstupem, na kterém je napětí 4,6V a vstupem invertujícím s napětím 3V), vzrostlo by napětí na invertujícím vstupu IC1D. Tento nárůst napětí způsobí překlopení komparátoru, aktivaci funkce MUTE a následné odpojení zátěže.

Tepelnou ochranu zajišťuje komparátor s operačním zesilovačem IC1B. Ten porovnává dvě napětí – referenční napětí, které je zavedeno do neinvertujícího vstupu a napětí dané děličem s termistorem R47, odporovým trimrem P1 a rezistorem R9. Napětí na neinvertujícím vstupu je určeno poměrem rezistorů R7 a R8, v tomto případě je to jedna polovina napájecího napětí pro operační zesilovače, tedy 7,5V. Pokud je okamžitá hodnota odporu teplotního čidla větší, než součet odporu trimru P1 a rezistoru R9, je na neinvertujícím vstupu komparátoru větší napětí než na vstupu invertujícím a komparátor se tak nachází na vysoké úrovni. Jakmile, ale vlivem oteplení čidla dojde k poklesu jeho odporu (čidlo je typu NTC, tzn. že s rostoucí teplotou jeho odpor klesá), napětí na invertujícím vstupu tak vzroste na hodnotu vyšší než 7,5V a komparátor přejde do nízké úrovně. Přes diodu D6 se vybije

kondenzátor C5 a C4 se nabije na zápornou hodnotu. Napětí na neinvertujícím vstupu obvodu IC1D poklesne, což způsobí, že dojde k jeho překlopení a následné aktivaci ochranného obvodu. Pokud teplota chladiče poklesne a komparátor IC1B přejde znovu do vysoké úrovně, začne se nabíjet nejen kondenzátor C5, ale i záporně nabitý kondenzátor C4. Napětí na rezistoru R27 vzroste a zesilovač je znovu uveden do provozu. Aby na hranici kritické teploty (teploty, kdy dojde k překlopení IC1B) nedošlo k rozkmitání komparátoru, je pomocí diody D3 a rezistoru R6 nastavena hystereze obvodu. K deaktivaci ochranného obvodu tak dojde až poté, co teplota chladiče klesne o několik °C pod kritickou hodnotu.

Aby při zapínání zesilovače nedocházelo k charakteristickému a nepříjemnému „lupnutí“ v připojených reproduktorech, je ochranný obvod vybaven zpožděným připínáním zátěže. Tuto funkci obstarává napěťový dělič tvořený trojicí rezistorů R25, R26 a R27 společně s kondenzátory C4 a C5. Na invertujícím vstupu komparátoru IC1D se referenční napětí +3V objeví ihned po zapnutí zesilovače. Napětí potřebné k překlopení komparátoru je sledováno na rezistoru R27 připojeného ke vstupu neinvertujícím. Úbytek na něm je dán napětím na kondenzátoru C5, který se začne po zapnutí přes poměrně velké rezistory R25 a R26 nabíjet pomalu. Napětí +3V potřebné k překlopení se na něm tedy objeví až se zpožděním.

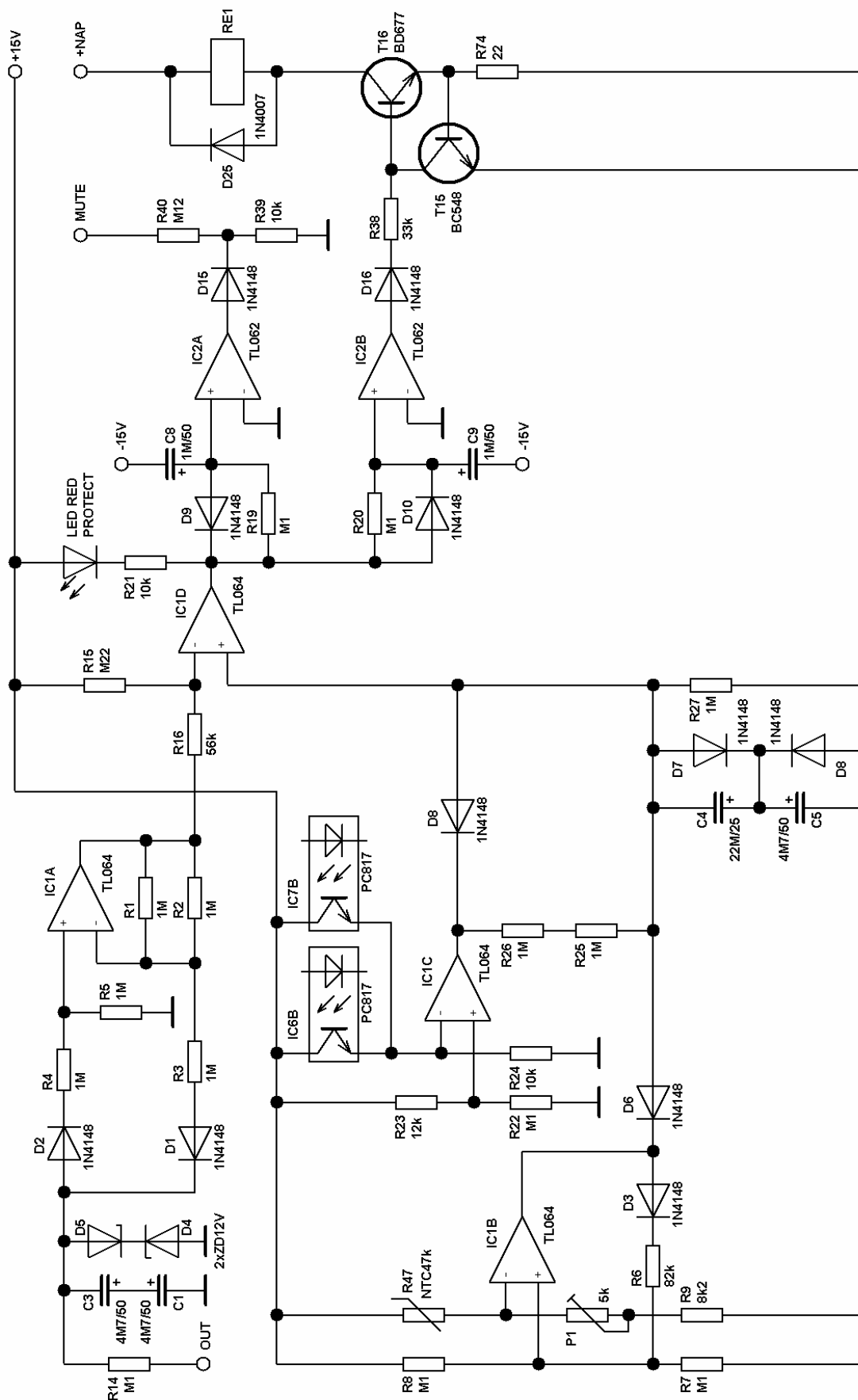
Poslední částí ochranného obvodu je druhá polovina proudové pojistky – tedy část s optotranzistory. Pokud dojde k proudovému přetížení zesilovače, otevře se vlivem svitu fotodiody jeden z tranzistorů. Na invertující vstup komparátoru s obvodem IC1C je tak přivedeno napětí +15V. Toto napětí je vyšší, než napětí na rezistoru R22. To je dáno odporovým děličem R22/R23 a jeho velikost je s danými hodnotami rezistorů asi 13,4V. Hodnota napětí je dána vztahem podobným, jako v předchozích případech:

$$U_{R22} = \frac{R22}{R22 + R23} \cdot 15 \quad [\text{V}] \quad (7.13)$$

Díky nárůstu napětí na invertujícím vstupu komparátoru IC1C dojde k jeho překlopení do nízké úrovně, vybití kondenzátoru C5, následnému překlopení komparátoru IC1D do nízké úrovně a odpadnutí kotvy relé.

Jakákoliv nebezpečná situace je tedy ochranným obvodem detekována a aktivace ochrany (odpojení zátěže) je signalizována rozsvícením červené LED diody PROTECT připojené přes omezovací rezistor mezi výstup komparátoru IC1D a napětí +15V.

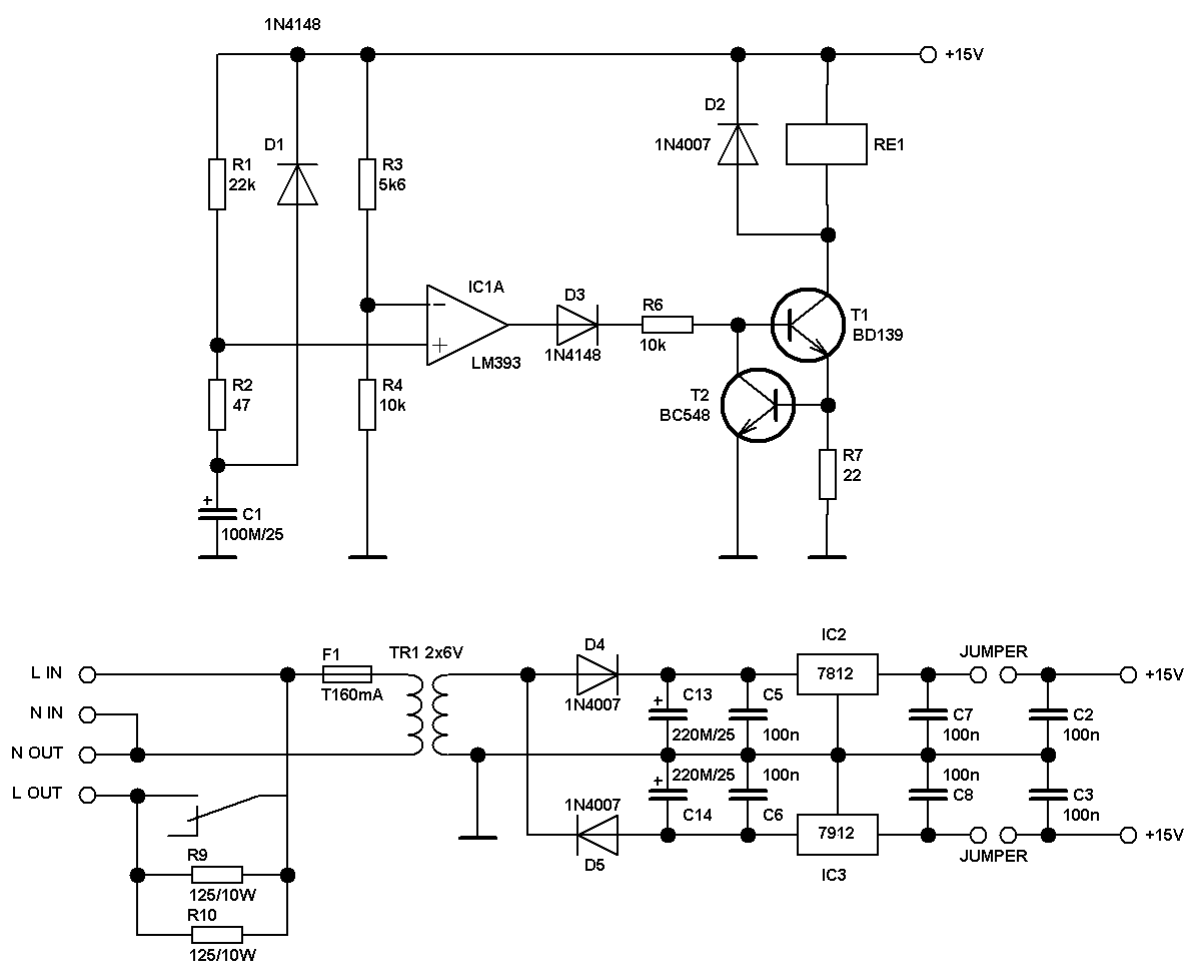
Celkové zapojení ochranného obvodu ukazuje následující obrázek.



Obr. 31: Schéma zapojení ochranného obvodu

7.3 Softstart

Při zapínání, zvláště výkonných zesilovačů, jejichž napájecí zdroje obsahují velké toroidní transformátory, by vlivem velkého proudového nárazu po zapnutí mohlo dojít k přepálení tavné pojistky v primárním vnutí transformátoru a nebo dokonce vybavení spouště jističe v elektrickém rozvaděči. Aby došlo k eliminaci proudové nárazu, zařazuje se na krátkou dobu po zapnutí zesilovače do cesty proudu tekoucím primárním vinutím transformátoru rezistor o velikosti desítek Ω . Tento rezistor je po ustálení poměrů v zesilovači (nabití filtračních kondenzátorů) přemostěn kontakty spínacího relé. Doba sepnutí se tedy nastavuje na jednotky sekund.



Obr. 32: Schéma zapojení omezení proudového nárazu

Vlastní obvod softstartu je řešen podobným způsobem jako obvod zpožděného připínání reproduktorů (viz obr. 32). Napětí na kondenzátoru C1 je komparátorem porovnáváno s referenčním napětím odporového děliče tvořeného rezistory R3/R4. Toto napětí o velikosti asi 10V je přivedeno na invertující vstup komparátoru. Kondenzátor C1 je nabíjen přes rezistor R1. Napětí (tedy 10V) potřebné pro překlopení komparátoru na něm stoupne až po několika vteřinách. Jakmile napětí na neinvertujícím vstupu (kondenzátoru) dosáhne velikosti napětí děliče, dojde k překlopení komparátoru do vysoké úrovně, kondenzátor C4 se nabije a napětí na něm způsobí sepnutí tranzistoru T2. V jeho kolektoru je zapojeno relé, kterým tak začne protékat proud – relé sepne. Napájení relé je řešeno stejně

jako v případě ochranného obvodu proudovým zdrojem s tranzistorem T2. Jmenovitý proud relé způsobí na rezistoru R7 úbytek 0,65V, který je dostatečný pro otevření tranzistoru T2. Ten pak uzemňuje bázi tranzistoru T1, který reguluje proud cívkou relé.

Velikost doby zpoždění je závislá na hodnotách kondenzátoru C1 a rezistoru R1. Změnou hodnot těchto součástek dojde ke změně doby zpoždění.

Aby při zapínání a vypínání zesilovače v malém časovém intervalu nebyl plynulý náběh zdroje vyřazen z provozu, je ke kondenzátoru C1 připojena dioda D1, která po poklesu napájecího napětí způsobí okamžité vybití kondenzátoru. Dojde tak následnému rozepnutí kontaktů relé.

Rezistory R9 a R10, zařazované do primárního okruhu toroidního transformátoru v době zapnutí přístroje je vhodné, vzhledem k velikosti procházejícího proudu, dimenzovat na vyšší výkonové zatížení. A to i přesto, že se jedná pouze o jejich dočasné zapojení v obvodu. Případné selhání „zkratovacího“ relé by tak mohlo daleko snáz dojít k poškození přístroje vlivem přehřátí rezistoru.

Kvůli nezávislosti obvodu omezení proudového nárazu na hlavním napájecím zdroji zesilovače, je tento vybaven vlastním zdrojem. Aby celkový přístroj nebyl příliš drahý, bylo mým úkolem použít některé prvky z původního zesilovače. Osadil jsem tedy i síťový transformátor z původního „softstartu“. Jeho sekundární napětí je ale příliš malé (2x6V), bylo nutné pro dosažení napětí $\pm 15V$ potřebného pro napájení komparátoru použít jednocestný usměrňovač. Dvě vinutí původního transformátoru jsou proto pro dosažení vyššího sekundárního napětí spojena a pro usměrnění je použit dvojité jednocestný usměrňovač. Zvlnění takto usměrněného signálu si sice značné, nicméně pro účely napájení tohoto obvodu je však dostačující. Za diodovým usměrňovačem, následuje dvojice filtračních kondenzátorů. Jejich kapacita by neměla být příliš velká, aby po vypnutí zesilovače nezůstávalo relé delší dobu sepnuto. Dvojice integrovaných stabilizátorů udržuje napájecí napětí na hodnotě $\pm 12V$.

7.4 Napájecí zdroj

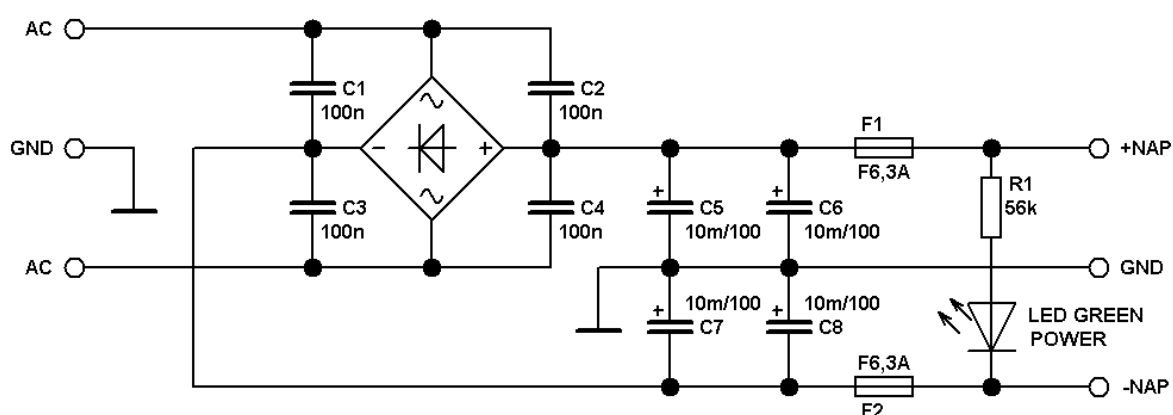
Pokud pomineme digitální zesilovače a zesilovače se spínaným zdrojem, je napájení zesilovačů řešeno klasickým napájecím zdrojem s toroidním transformátorem. Použití toroidního transformátoru v oblasti nízkofrekvenčních zařízení je jakýmsi nepsaným pravidlem. Jeho výhodou oproti klasickému transformátoru s jádrem skládaným z EI plechů je fakt, že jeho elektromagnetické rušení je nesrovnatelně menší.

Jedná se tedy o zdroj symetrického napětí - střídavé napětí ze sekundárního vinutí transformátoru je přivedeno na jeden 35A usměrňovací můstek. Protože celkový odběr zesilovače zdaleka nedosahuje hodnoty 35A, není nutné diodový můstek montovat na přídavný chladič. Kvůli zamezení pronikání rušení ze zdroje je paralelně ke každé usměrňovací diodě připojen kondenzátor s kapacitou 100nF. Usměrněné napětí je filtrováno blokem elektrolytických kondenzátorů. Jejich kapacita je 10mF na každou větev napájecího napětí, což není hodnota nijak vysoká. Vzhledem k ceně kondenzátorů s tak velkou kapacitou jsem byly použity dva kusy z původního zesilovače. Deska je však navržena pro čtyři kusy kondenzátorů, není proto složité zbývajících dva kusy v případě potřeby osadit. S přihlédnutím na rezervu zdroje při signálových špičkách a na celkovou dynamiku produkce je použití vyšší

kapacity filtračních kondenzátorů doporučováno. V praxi se hodnota pohybuje minimálně kolem $20.000\mu\text{F}$ i více na jednu větev napájecího napětí.

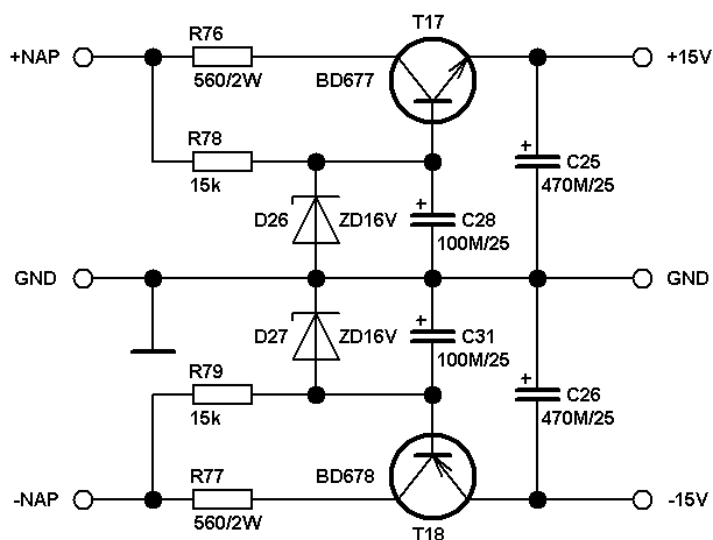
Napětí je dále přes rychlé tavné trubičkové pojistky přivedeno na napájecí svorky koncových zesilovačů. Pro indikaci přítomnosti napětí je mezi kladnou a zápornou větev napájecího napětí přes omezovací rezistor připojena indikační LED dioda POWER.

K napájení zesilovače je použit toroidní transformátor z původního zesilovače. Měřením jsem zjistil, že velikost sekundárního napětí naprázdno je (při napětí sítě 230V) asi 55V střídavých. Po usměrnění je na výstupních svorkách nezatíženého napájecího zdroje napětí $\pm 77\text{V}$. Integrovaný budič umožňuje napájet zesilovač napětím až $\pm 100\text{V}$, není proto v tomto případě využito všech jeho „možností“ a dosaženo tak maximálního výstupního výkonu. Schéma zapojení hlavního napájecího zdroje ukazuje obr. 29.



Obr. 33: Schéma zapojení napájecího zdroje

Integrované obvody osazené ve vstupních obvodech a obvodech ochran, vyžadují ke své činnosti symetrické napájecí napětí $\pm 15\text{V}$. Toto napětí zajišťuje pomocný napájecí zdroj, který je umístěn přímo na desce koncového stupně (viz obr. 34.).



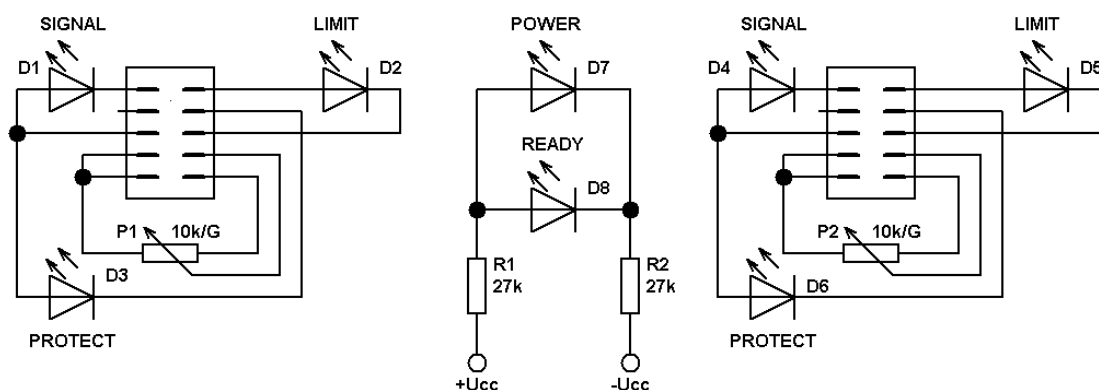
Obr. 34: Schéma zapojení pomocného napájecího zdroje

Jedná se o zapojení stabilizátoru napětí se Zenerovou diodou a s výkonovým tranzistorem. Napájecí zdroj pomocného napětí je závislý na napájecím napětí koncových zesilovačů. Napětí z tohoto zdroje je přes pomocné rezistory R76 a R77, jejichž úkolem je omezit ztrátu na tranzistorech stabilizátoru, přivedeno na parametrický stabilizátor napětí zapojený do báze výkonového tranzistoru. Rezistory R78 a R79 nastavují pracovní bod Zenerovy diody a je vhodné je připojit ještě před omezovacím rezistorem stabilizačních tranzistorů. Vlivem změny odebíraného proudu se na omezovacích rezistorech mění úbytek napětí. Napětí pro Zenerovu diodu by pak mohlo zbytečně kolísat. Paralelně k diodám jsou zapojeny elektrolytické kondenzátory C38 a C31. Stabilizované napětí je dále filtrováno kondenzátory C25 a C26 a přivedeno k jednotlivým obvodům.

Na výkonových tranzistorech vzniká úbytek napětí, je proto lepší volit Zenerovy diody s jmenovitým napětím o málo vyšším. Např. pro stabilizátor 15V je vhodné zvolit diodu se napětím 16V.

7.5 Indikační LED panel

Aby měl uživatel zesilovače přehled o provozních stavech přístroje, je tento vybaven několika LED diodami, které indikují zapnutí přístroje – LED diody POWER a READY, přítomnost signálu v jednotlivých kanálech – LED diody SIGNAL, limitaci výstupního signálu způsobenou příliš velkým buzením koncového stupně – LED diody LIMIT a aktivaci ochranného obvodu – LED diody PROTECT. Kvůli usnadnění montáže a celkového mechanického řešení zesilovače jsou všechny výše zmiňované indikační diody spolu s potenciometry sloužícími k ovládání hlasitosti umístěny na společné desce s plošnými spoji. Ta je pak pomocí distančních sloupků uchycena k přednímu panelu zesilovače. Tvoří tak zároveň jakýsi „subpanel“, který zakrývá montážní matice potenciometrů. Dvěma plochými kabely se samořeznými konektory typu PFL je deska propojena s jednotlivými kanály zesilovače. Indikační LED dioda POWER je propojena krouceným párem vodičů s napájecím zdrojem.

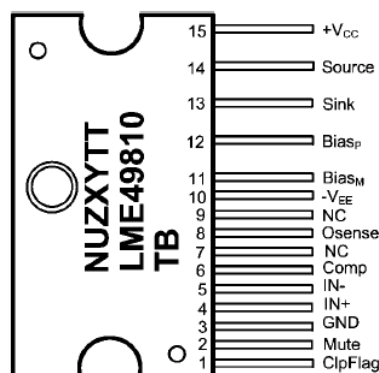


Obr. 35: Schéma zapojení indikačního LED panelu

Obrazce desek plošných spojů, stejně, jako osazovací výkresy a seznamy komponentů jednotlivých modulů jsou obsaženy v přílohách na konci práce.

8 NASTAVENÍ ZESILOVAČE A JEHO UVEDENÍ DO PROVOZU

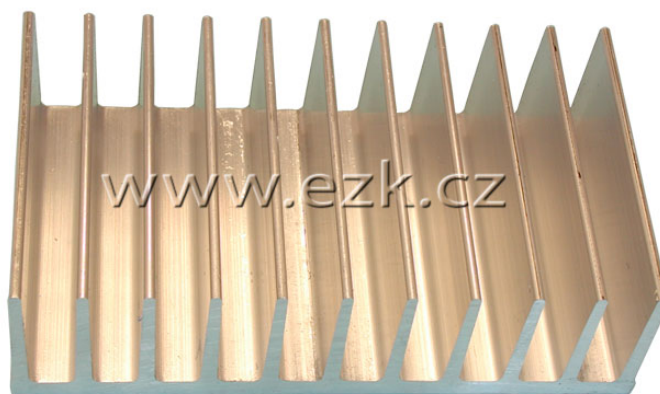
Všechny desky byly navrženy pomocí software Eagle a jejich předlohy jsou uvedeny v přílohách včetně osazovacích výkresů s seznamu použitých komponentů. Pouzdro obvodu LME49810 je, jak je vidět na obr. 32, atypické a v knihovně programu Eagle se nenachází. Bylo proto dodatečně vytvořeno. Všechny ostatní součástky jsou standardní a běžně dostupné.



Obr. 36: Pouzdro obvodu LME49810

Deska koncového stupně je oboustranná a vyžadovala prokovení všech otvorů. Po optické kontrole a odstranění zjištěných zkratů na desce vzniklých nedoleptáním mědi, jsem desku osadil všemi součástkami kromě tranzistorů, které jsou umístěny na chladiči. Všechny integrované obvody, kromě obvodu LME49810 jsou umístěny v patičích, aby v případě opravy byla jejich výměna jednodušší.

Po osazení desky bylo potřeba připravit chladič pro montáž výkonových tranzistorů. Jak už jsem psal dříve, chtěl jsem, aby chladič zesilovače tvořil boční stěnu přístroje. Bylo tedy nutné zvolit chladič vhodných rozměrů. Z dostupných se na toto místo nejvíce hodil chladič dodávaný firmou EZK pod označením CHL353 (viz obr. 33), který vyhovoval především svou šířkou a výškou žebrování. Chladič se ale standardně dodává v délkách 50mm a 70mm. Hloubka skříně původního zesilovače je ale 283mm. Nezbyvalo tedy nic jiného, než koupit chladič v délce 1m a ten pak na vyhovující rozměr zkrátit.



Obr. 37: Chladič CHL353 dodávaný firmou EZK (převzato z [17])

Po úpravě chladiče na patřičný rozměr jsem předvrtal díry pro závity. Po vyřezání závitů byl chladič připraven pro montáž výkonových tranzistorů. Postup při jejich osazování byl následující: Vývody všech tranzistorů jsem ohnul o 90° směrem nahoru a tranzistory volně vložil do otvorů v desce plošných spojů. Poté jsem tranzistory pomocí šroubů M3 přišrouboval k chladiči. Desku jsem pomocí distančních sloupků o výšce 8mm rovněž ve čtyřech rozích uchytil k chladiči. Teprve poté jsem vývody tranzistorů k desce cínovou pájkou přiletoval. Tento postup by měl zajistit, že všechny tranzistory by měly celou plochou bez zbytečného pnutí doléhat k chladiči. Desku jsem pak demontoval a místa, kde tranzistory doléhají k chladiči jsem potřel silikonovou vazelínou, jejíž úkolem je zmenšit tepelný odpor mezi chladičem a doléhající plochou tranzistoru. Pod tranzistory 2SC5200/2SA1943 a BD677/BD678 jsem umístil slídové podložky, které zajišťují elektrickou izolaci tranzistorů od chladiče. Výše zmiňované tranzistory mají totiž chladičí plochu spojenou s kolektorem a jejich přímou montáží na chladič by došlo ke zkratu napájecího napětí. Ostatní tranzistory mají pouzdra izolovaná.

Nyní následovalo vlastní „oživení“ modulů. K „oživení“ jsem použil dvojitý regulovatelný zdroj s proudovým omezením, tónový generátor, osciloskop, multimetr a umělou zátěž v podobě výkonových rezistorů s celkovým odporem 8Ω. K modulu zesilovače jsem připojil napájecí zdroj, na výstup zesilovače (před kontaktem relé) jsem připojil osciloskop a na jednom emitorovém rezistoru jsem sledoval úbytek napětí, který je úměrný klidovému proudu zesilovače. V první části jsem vstupní signál ani zátěž k zesilovači nepřipojil. Na regulovatelném zdroji jsem nastavil proudové omezení na hodnotu 400mA. Tato hodnota by měla zajistit, že při případné chybě v zesilovači by nemělo dojít k poškození výkonových tranzistorů. Podle údajů výrobce obvodu LME49810 by měl zesilovač začít fungovat od napájecího napětí ±20V. Zvyšoval jsem tedy postupně napětí napájecího zdroje a sledoval jak klidový proud zesilovače, tak velikost stejnosměrného napětí na jeho výstupu. Při napětí asi ±6V ale došlo k rozkmitání zesilovače. Na osciloskopu byl patrný signál o vysoké frekvenci, jehož offset byl asi -3V. Úbytek na emitorovém rezistoru byl 70mV, což odpovídá proudu 149mA. Při třech párech tranzistorů je to přibližně hodnota proudového omezení nastaveného na napájecím zdroji. Tato hodnota je příliš vysoká, bylo tedy zřejmé, že zesilovač není v pořádku. Zkusil jsem tedy rezistorovým trimrem P2 zvyšovat klidový proud. Kmitání zesilovače, ale neustalo. Připojil jsem tedy sondu osciloskopu na neinvertující vstup budiče. I v tomto místě se objevil vysokofrekvenční signál. Bylo tedy zřejmé, že kmitání zesilovače vzniká už ve vstupní části zesilovače.

Vypnul jsem napájecí zdroj, pomocí rezistoru s odporem několik desítek Ω jsem spojil kladnou i zápornou napájecí svorku zesilovače, aby došlo k vybití kondenzátorů a vyjmul jsem obvod IC4 (NE5532) z patice. Tento jsem nahradil typem TL062. Znovu jsem zapnul napájecí zdroj a postupně zvyšoval napájecí napětí v obou větvích. Napětí jsem zvyšoval až do maximálního výstupního napětí zdroje, tedy do hodnoty ±50V. Na výstupu zesilovače bylo stále nulové napětí (to jsem sledoval na osciloskopu) a úbytek na emitorovém odporu byl 3mV. To odpovídalo klidovému proudu 20mA. Tato hodnota je příliš malá, otáčením trimru P2 jsem proto klidový proud zvýšil na 65mA (úbytek na emitorovém odporu byl 10mV). Tyto hodnoty již odpovídají správně fungujícímu zesilovači.

Stejným způsobem se choval i druhý kanál zesilovače, kde jsem musel rovněž obvod NE5532 nahradit obvodem TL062. První ze zmiňovaných obvodů byl náchylný k rozkmitání. Pro jeho použití jsem se rozhodl, protože výrobce uvádí, že se jedná o obvod „ultra nízkošumový“. Jeho použití ve vstupní části zesilovače jsem považoval za vhodné.

Při vypnutém napájecím zdroji jsem na vstup zesilovače připojil signál o frekvenci 1kHz z tónového generátoru. Protože zesilovač má symetrický vstup, invertující část vstupu jsem propojil se signálovou zemí a generátor připojil mezi kladnou část vstupu a zem. Po zapnutí zesilovače jsem sledoval na osciloskopu výstupní signál. V záporné půlce výstupního signálu se objevoval malý zákmit, který ale byl po mírném zvýšení klidového proudu odstraněn. Napětí vstupního signálu jsem zvyšoval až do úrovně limitace výstupního signálu za současného sledování jeho tvaru. Až to místa omezení nejevil výstupní signál žádné známky tvarové deformace. Snížil jsem tedy úroveň vstupního signálu tak, aby nedocházelo k limitaci zesilovače a zkontroloval jeho funkci i pro okrajová pásma slyšitelného spektra. Až do kmitočtu cca 35kHz zesilovač nejevil známky zkreslení nebo poklesu úrovně výstupního signálu.

Další částí bylo testování zesilovače s připojenou zátěží. K výstupu zesilovače jsem připojil „umělou zátěž“ tvořenou sítí výkonových rezistorů o výsledném odporu 8Ω a celkovému výkonovému zatížení 160W (jednalo se o osm kusů sériově zapojených rezistorů s odporem 1Ω a výkonem 20W). I v tomto případě zesilovač fungoval a neprojevoval známky nefunkčnosti. Musel jsem této zátěži přizpůsobit i buzení zesilovače tak, aby nedošlo k jejímu přetížení. Po mírném zahřátí chladiče jsem pomocí multimetru zkontroloval klidový proud, který se od nastaveného příliš neměnil.

Nyní jsem k zesilovači připojil reprosoustavu a na vstup přivedl hudební signál. Napájení zesilovače nyní obstarával budoucí zdroj s toroidním transformátorem. Buzení zesilovače jsem zvyšoval do té doby, dokud nedocházelo ve špičkách k limitaci výstupního signálu (limitaci signálu indikuje rozsvícení LED diody LIMIT). Za těchto podmínek jsem pomocí rezistorových trimrů P3 a P4 nastavil proudovou pojistku tak, aby docházelo se silně limitujícím signálem k výpadkům reprodukce. Tímto nastavením proudové pojistky by měly být koncové tranzistory chráněny před poškozením vlivem výkonového přetížení.

Nastavení tepelné pojistky bylo poněkud komplikovanější. Pokud uvažujeme vliv tepelných odporů mezi čipem tranzistoru a chladičem, je při teplotě 80°C na chladiči teplota čipu podstatně vyšší. Obecně se doporučuje, aby teplota chladiče nepřesáhla hodnotu $75-80^{\circ}\text{C}$. Výkonová ztráta (mně dostupné) umělé zátěže mně nedovolila této teploty dosáhnout. Buzení hudebním signálem, který následně zesílený by zesilovač dodával do reproduktorové soustavy by způsobilo velký hluk. Tato možnost pro mě byla taky nepřípustná, nastavil jsem tedy rezistorový trimr P1 do polohy, kdy mezi jeho jezdcem a okrajem odporové dráhy je největší odpor. Z hlediska nastavení tepelné pojistky je to situace, kdy tepelná ochrana zareaguje nejdříve.

Stejným způsobem proběhlo uvedení do provozu i v případě druhého kanálu zesilovače. Takto „oživené“ moduly byly připraveny pro montáž do přístrojové skříně. Po mechanickém připevnění k šasi zesilovače a propojení, jak se vstupními a výstupními konektory, tak s napájecím zdrojem jsem zesilovač uvedl do provozu. Po připojení obou signálových kabelů ale došlo ke vzniku tzv. „zemní smyčky“, která se projevovala ne zrovna zanedbatelným brumem indukovaným do vstupu zesilovače. K odstranění tohoto problému jsem využil doporučení podle [16], kdy jsem v levém kanálu zesilovače zařadil do cesty signálové země rezistor s odporem 270Ω . Takto „odzeměný“ kanál zesilovače vzniklý brum eliminoval.

9 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Jedním z požadavků vyplývajícím ze zadání bylo navrhnout a realizovat mechanickou konstrukci umožňující vestavbu nového zesilovače do původní skříně. Na tomto místě se s ohledem na co nejefektivnější využití stávajícího materiálu nabízela koncepce, kdy chladiče koncových tranzistorů tvoří boční stěny přístroje. Podobným způsobem byl řešen i zesilovač původní. Tento způsob není, jak již bylo řečeno dříve, zcela optimální z hlediska odvodu tepla z přístroje umístěného v uzavřené skříni RACK, ale vzhledem k poměrně velké ploše chladiče by uchazení koncových tranzistorů nemělo činit problém.

Na tomto místě se nabízela možnost zvolit takovou koncepci, kde chladič (boční stěna) je tvořen z několika vedle sebe poskládaných menších chladičů běžně dostupných a to i cenově. Ty jsou mezi sebou spojeny plnými duralovými hranoly, které slouží jednak jako nosné prvky, ale zároveň jako prvky pro přenos tepla. S těmito hranoly je pak tepelně spojena bočnice (duralový plech), na kterou jsou uchyceny koncové tranzistory. Bylo by možné použít chladiče i bez spojovacích hranolů, z hlediska rovnoměrnějšího rozložení tepla je však jejich použití vhodnější. Mezi všechny mechanické spoje je pak bezpodmínečně nutné nanést vrstvu silikonové pasty pro zlepšení přenosu tepla mezi jednotlivými kusy.

Na internetových stránkách firmy EZK jsem ale po čase objevil chladič (CHL353, obr.33), který svými rozměry vyhovoval použití v budoucím přístroji. Jeho cena přitom byla relativně přijatelná. Po konzultaci s vedoucím projektu byl chladič zakoupen a následně upraven na patřičné rozměry.

Přístrojová skříň byla, až na mírné úpravy způsobené použitím jiného typu chladiče, použita beze změny původní. Protože deska s plošnými spoji je relativně široká a koncové tranzistory by rozměrově mezi dva nosné rámy skříně nevešly, horní i dolní rám byl ve dvou místech přerušen mezerou o délce asi 85 mm. Nosnou funkci pak nahradily chladiče, pomocí kterých byly tímto způsobem vytvořené čtyři prvky spojeny.

V předním panelu měl původní zesilovač umístěno pět LED diod indikujících provozní stav zesilovače. Nový zesilovač informuje uživatele pomocí sedmi LED diod, byly proto do předního panelu vyvrtány další dva otvory o průměru 5mm. Osy potenciometrů k regulaci hlasitosti mají průměr 6mm, byly pro zvětšeny i otvory v panelu na průměr 7mm. Ostatní otvory zůstaly původní. Zadní panel, včetně osazení konektorů (XLR konektory pro přivedení vstupního signálu, SPEAKON konektory a montážní šroubovací svorky pro připojení reprosoustav), je použit původní, pouze byly vyvrtány čtyři otvory o průměru 3,2mm pro uchycení plynulého náběhu zdroje z vnitřní strany panelu. Všechny panely včetně horního i dolního dílu po vyvrtání všech otvorů mechanicky očištěny pomocí jemného brusného papíru, technickým lihem odmaštěny a byla na ně nanesena vrstva syntetické černé matné barvy. Po zaschnutí povrchové úpravy byly panely opatřeny příslušnými samolepícími popisky.

10 ZÁVĚR

Cílem projektu bylo navrhnout koncepci stereofonního výkonového zesilovače pro ozvučovací účely, který používá moderní integrovaný budič LME49810. Zesilovač je vybaven všemi standardními ochranami, jako jsou ochrana proti stejnosměrnému napětí na výstupu zesilovače, tepelná a nadproudová ochrana.

V první části projektu je popsána problematika týkající se koncepce a druhů výkonových nízkofrekvenčních zesilovačů obecně. Byly zmíněny pojmy jako třída zesilovače, přechodové zkreslení, teplotní stabilizace, atd. V úvodní části bylo zmíněno i použití speciálních výkonových integrovaných obvodů používaných v nízkofrekvenční elektronice a to jak hybridních tak monolitických. Popsány byly taky způsoby realizace ochranných obvodů, kterými se koncové zesilovače doplňují. Poslední část úvodní stati je věnována napájecím zdrojům pro koncové zesilovače.

Hlavní část projektu tvoří popis zesilovače s integrovaným obvodem LME49810. Zde je popsána činnost obvodu koncového zesilovače s tímto obvodem, funkce proudové pojistky, obvodu pro udržení nulového stejnosměrného napětí na výstupu zesilovače. Rovněž je navržen a popsán ochranný obvod obsahující tepelnou pojistku a ochranu proti stejnosměrnému napětí na výstupu zesilovače. V poslední části je popsán napájecí zdroj jak koncového stupně, tak zdroj pro napájení pomocných obvodů. Součástí pojednání o napájecích zdrojích je popis obvodu pro plynulý náběh zdroje.

V další části je popsán postup při uvedení zesilovače do provozu a odstranění jednotlivých závad při „oživování“ zjištěných.

Poslední částí je část, kde je rozebrána mechanická konstrukce zařízení. Tato část obsahuje návrh modulového uspořádání zařízení v přístrojové skříni, návrh konstrukce hladiče koncových tranzistorů a celkový popis úpravy původní skříně.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Časopisecké články:

- [1] KRAUS, A. *Koncový zesilovač 1000W*. AR 8/2000, Praha 2000
- [2] KRAUS, A. *High End zesilovač 1kW*. AR 5/2002, Praha 2002
- [3] KRAUS, A. *Stereofonní výkonové zesilovače 2x150W až 2x600W*. AR 9/2002, Praha 2002
- [4] KRAUS, A. *Modul ochran pro koncové zesilovače*. AR 8/2003, Praha 2003
- [5] KRAUS, A. *Symetrický vstup s limiterem*. Amatérské radio AR 10/2001, Praha 2001
- [6] KRAUS, A. *Limiter s obvodem vactrol VTL5C3*. Amatérské radio AR 10/2001, Praha 2001
- [7] KRAUS, A. *Univerzální modul vstupů pro koncové zesilovače*. Amatérské radio AR 8/2003, Praha 2003
- [8] KRAUS, A. *Zapojení koncového stupně 300W s obvodem LME49810*. Amatérské radio AR 10/2007, Praha 2007

Internetové články:

- [9] NEHUDEK, A. *Časovač 555*. Dostupný z WWW: <http://nehudek.wz.cz/elektro/555.php>
- [10] VACULA, R. *Opožděné sepnutí reproduktorů*. Dostupný z WWW: <http://www.postreh.com/phprs/view.php?cislocclanku=2008081905>
- [11] HRUBÝ, F. *Symetrie, zemnění, signálové úrovně a jiné taškařice obecně i prakticky*. Dostupný z WWW: <http://www.zesilovace.cz/view.php?cislocclanku=2004021901>
- [12] VYSOKÝ, O. *Proporciální stupně s operačními zesilovači*. Dostupný z WWW: <http://dce.felk.cvut.cz/es/skripta/e2.pdf>

Odborné publikace:

- [13] WIRSUM, S. *Abeceda NF techniky*. BEN, Praha 1998
- [14] KOTISA, Z. *NF zesilovače - tranzistorové zesilovače*. BEN, Praha 2000
- [15] VLČEK, J., HAVLÍK, J. *Elektronika pro hudebníky*. BEN, Praha
- [16] VLACHÝ, V. *Praxe zvukové techniky*. Muzikus, Praha 1995

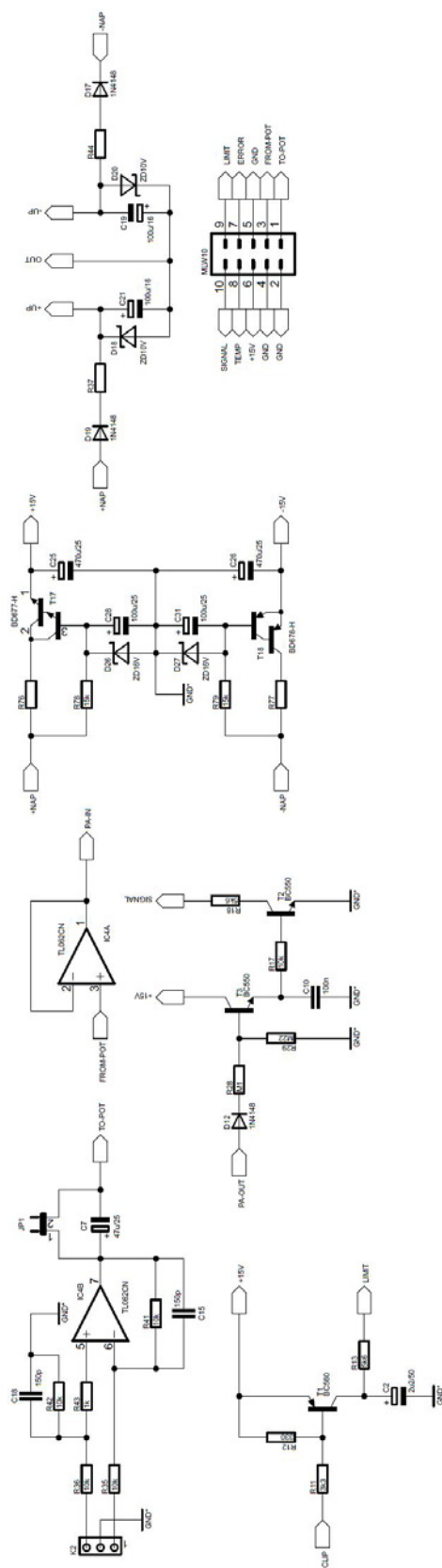
Konstrukční katalogy:

- [17] KRČMÁŘ, Z. *Katalog elektronických součástek*. EZK, Rožnov pod Radhoštěm 2006
- [18] HRŮZA, M. *Světla & Zvuk 2007*. Prodance, Praha 2007
- [19] DUDEK, P. *Teorie zesilovačů*. Dostupný z WWW: http://www.zewel.tuliscz.com/dpa_t2.php

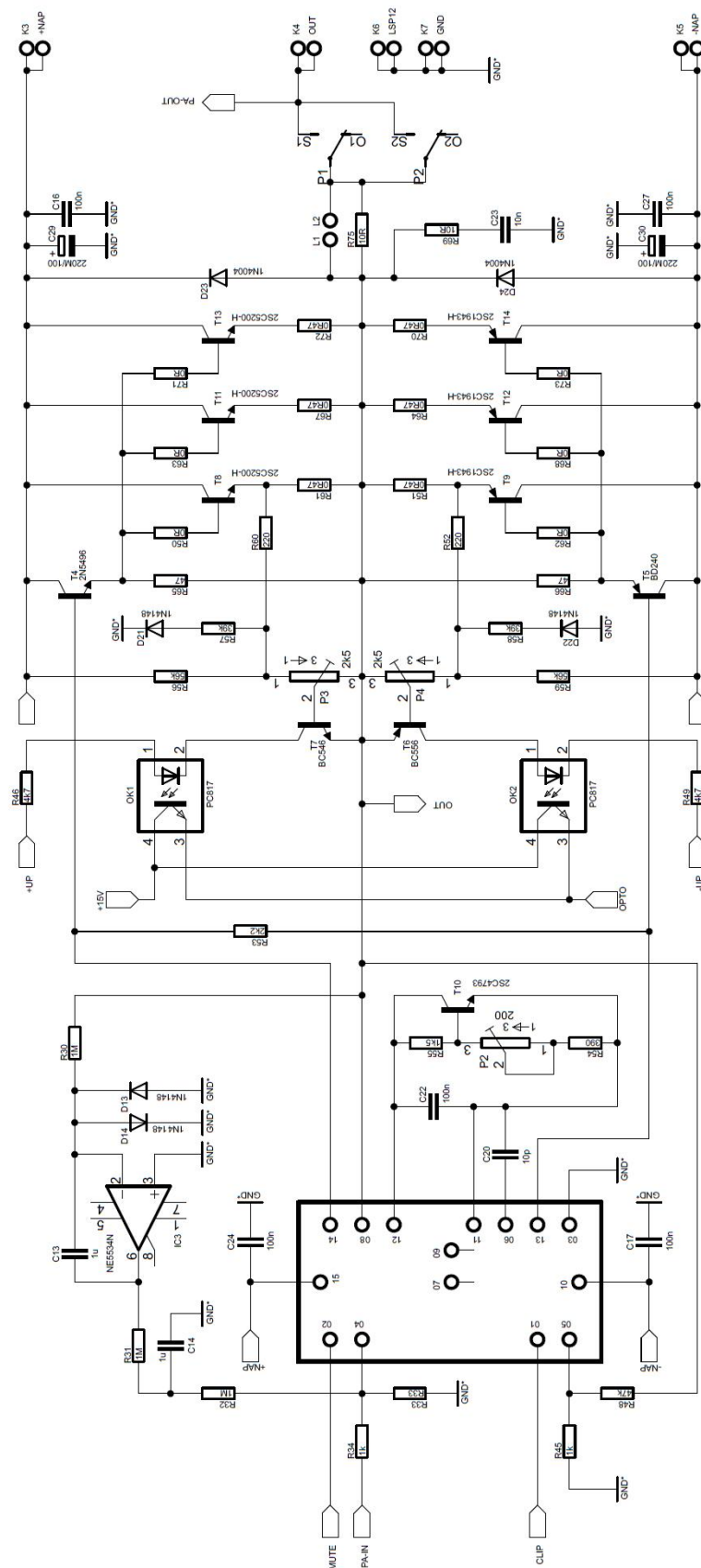
PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

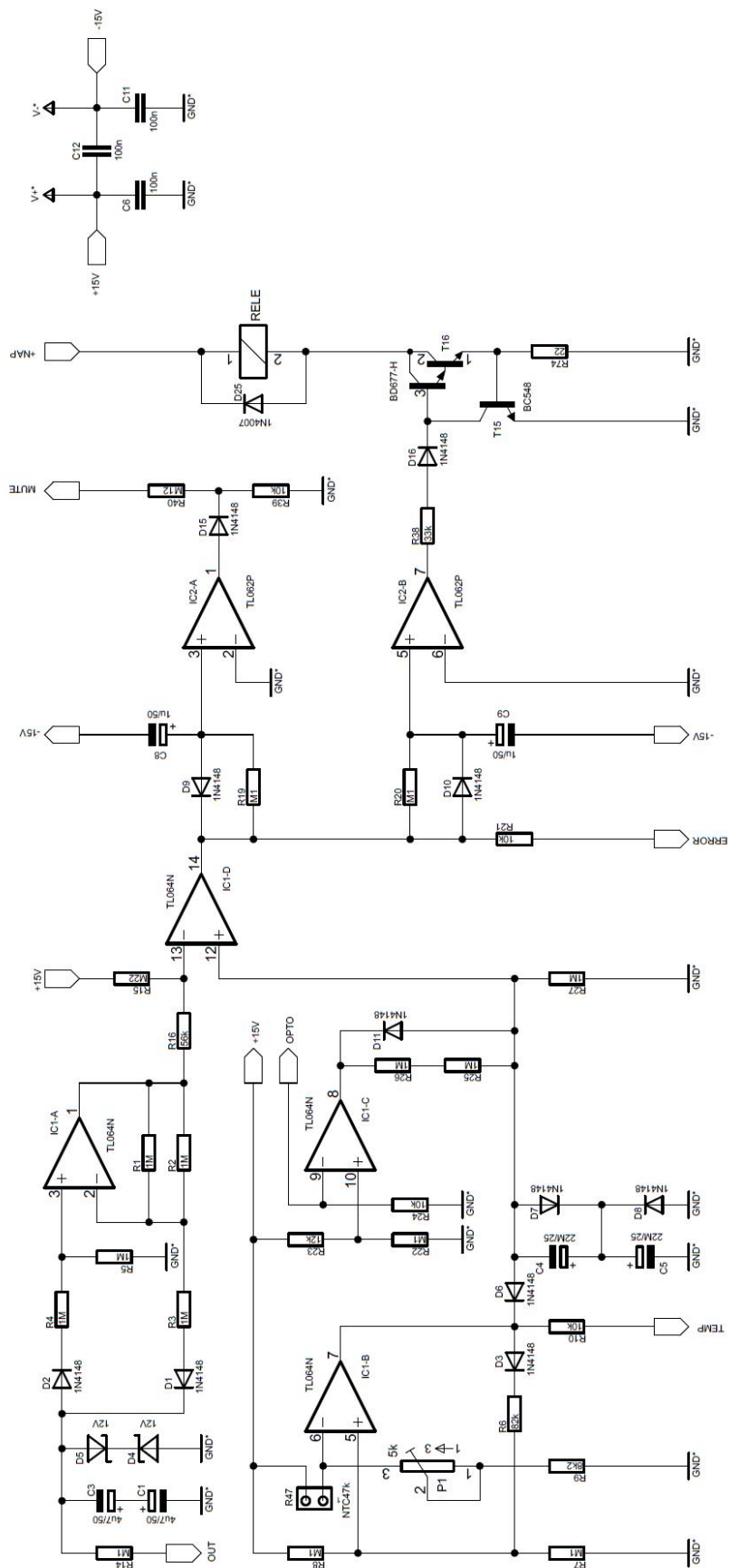
- A PODKLADY PRO KONSTRUKCI KONCOVÉHO ZESILOVAČE**
- B PODKLADY PRO KONSTRUKCI NAPÁJECÍHO ZDROJE**
- C PODKLADY PRO KONSTRUKCI OBVODU PLYNULÉHO NÁBĚHU ZDROJE**
- D NÁKRES PŘEDNÍHO PANELU ZESILOVAČE**
- E NÁKRES ZADNÍHO PANELU ZESILOVAČE**
- F NÁKRES HORNÍHO A DOLNÍHO PANELU ZESILOVAČE**



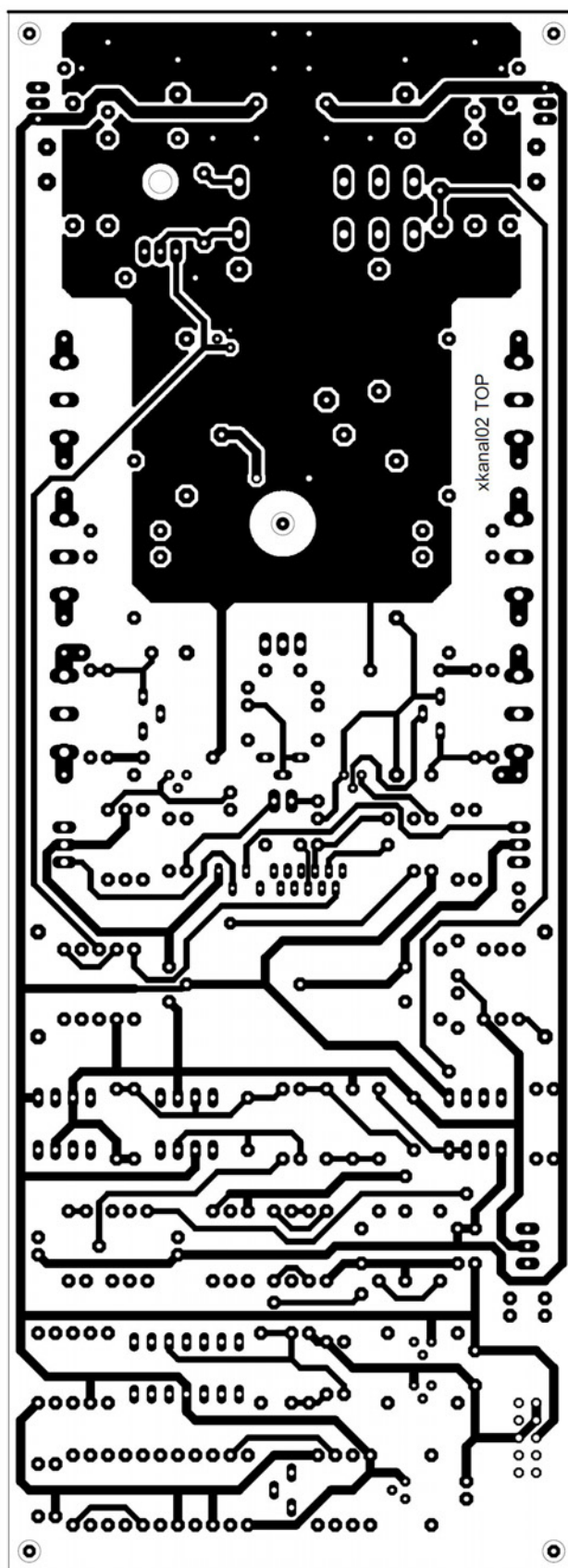
A.2 Schéma zapojení koncového stupně – část 2.



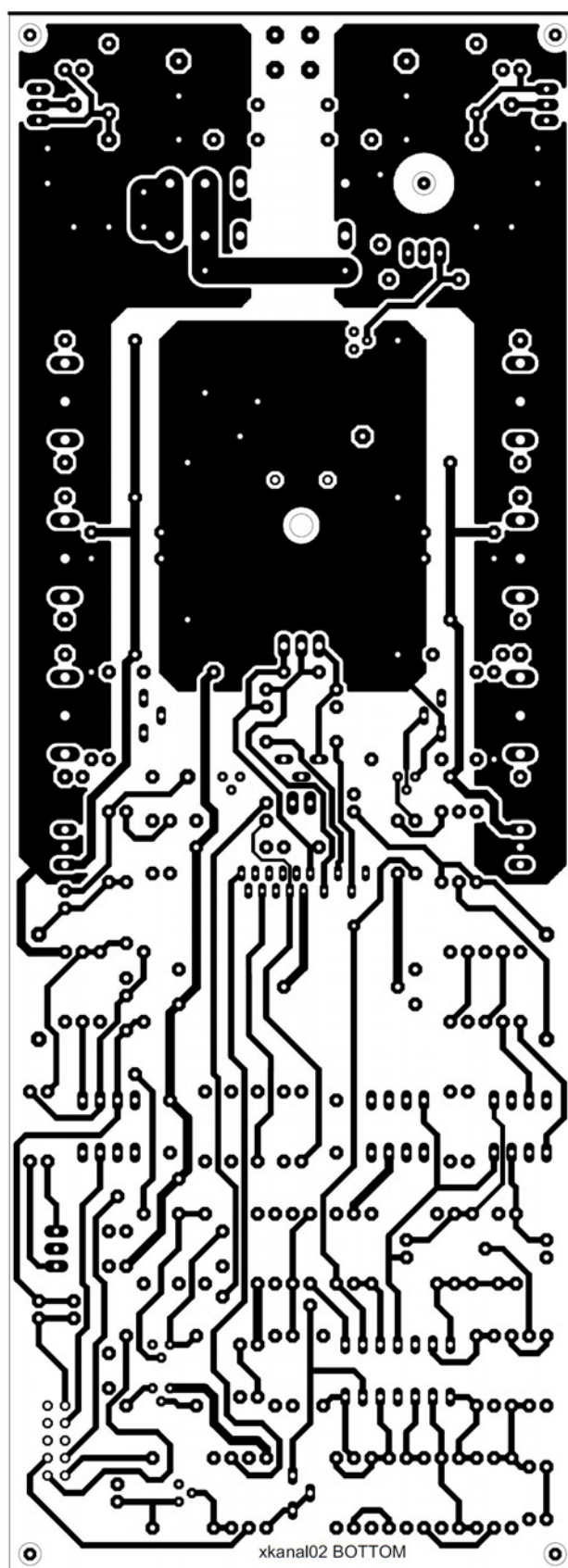
A.3 Schéma zapojení koncového stupně – část 3.



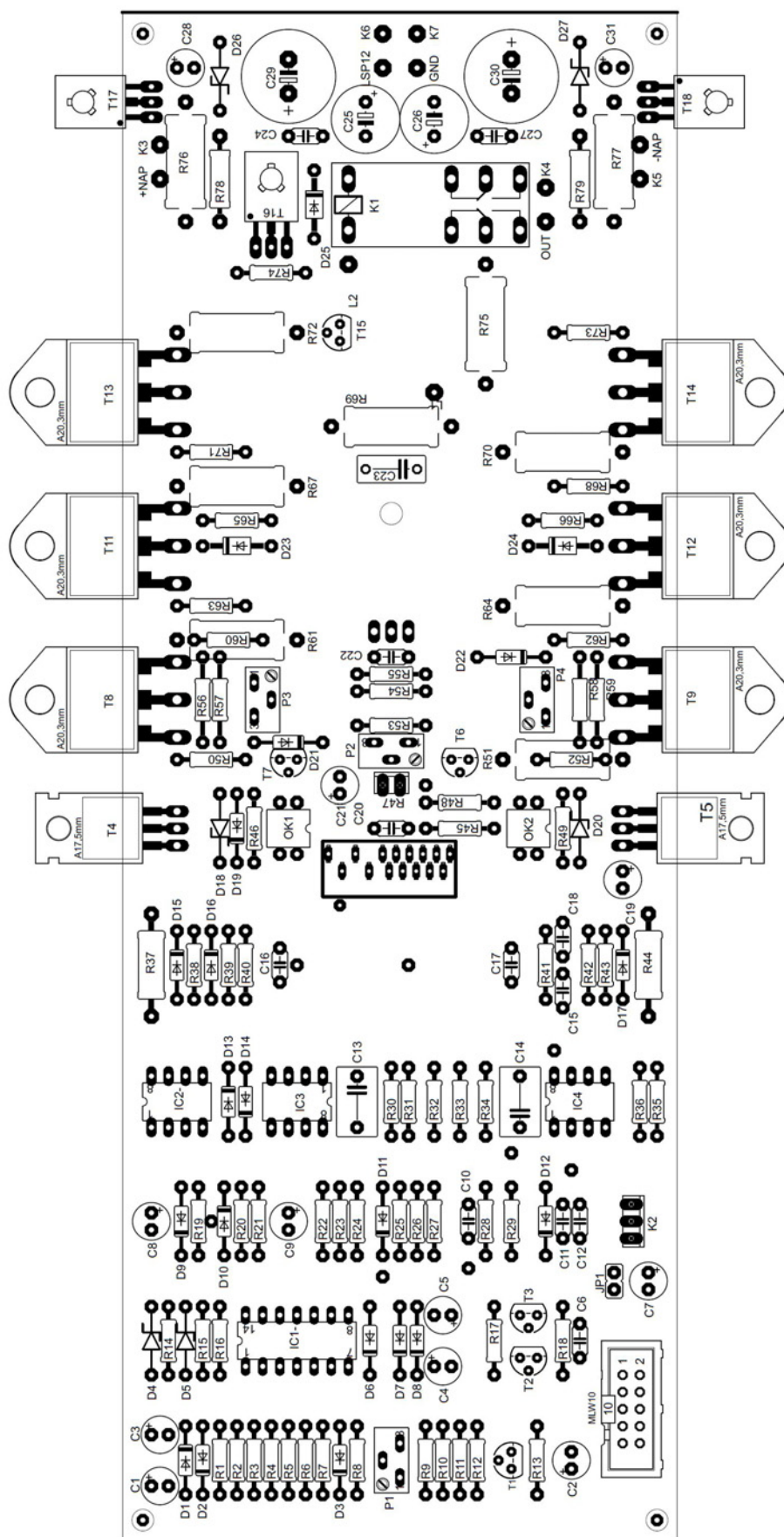
A.4 Horní strana spojů desky koncového stupně (měřítko 1:1)



A.5 Dolní strana spojů desky koncového stupně (měřítko 1:1)



A.6 Osazovací výkres koncového stupně



A.7 Seznam komponentů koncového stupně

Rezistory

| | |
|-----|--------|
| R1 | 1M |
| R2 | 1M |
| R3 | 1M |
| R4 | 1M |
| R5 | 1M |
| R6 | 82k |
| R7 | M1 |
| R8 | M1 |
| R9 | 8k2 |
| R10 | 10k |
| R11 | 3k3 |
| R12 | 330 |
| R13 | 5k6 |
| R14 | M1 |
| R15 | M22 |
| R16 | 56k |
| R17 | 10k |
| R18 | 5k6 |
| R19 | M1 |
| R20 | M1 |
| R21 | 10k |
| R22 | M1 |
| R23 | 12k |
| R24 | 10k |
| R25 | 1M |
| R26 | 1M |
| R27 | 1M |
| R28 | M1 |
| R29 | M22 |
| R30 | 1M |
| R31 | 1M |
| R32 | 1M |
| R33 | R33 |
| R34 | 1k |
| R35 | 10k |
| R36 | 10k |
| R37 | 10k |
| R38 | 33k |
| R39 | 10k |
| R40 | M12 |
| R41 | 10k |
| R42 | 10k |
| R43 | 1k |
| R44 | 10k |
| R45 | 1k |
| R46 | 4k7 |
| R47 | NTC47k |

| | |
|-----|---------|
| R48 | 47k |
| R49 | 4k7 |
| R50 | 0R |
| R51 | 0R47/2W |
| R52 | 220 |
| R53 | 2k2 |
| R54 | 390 |
| R55 | 1k5 |
| R56 | 56k |
| R57 | 39k |
| R58 | 39k |
| R59 | 56k |
| R60 | 220 |
| R61 | 0R47/2W |
| R62 | 0R |
| R63 | 0R |
| R64 | 0R47/2W |
| R65 | 47 |
| R66 | 47 |
| R67 | 0R47/2W |
| R68 | 0R |
| R69 | 10R/2W |
| R70 | 0R47/2W |
| R71 | 0R |
| R72 | 0R47/2W |
| R73 | 0R |
| R74 | 22 |
| R75 | 10R/2W |
| R76 | 560R/2W |
| R77 | 560R/2W |
| R78 | 15k |
| R79 | 15k |

Trimry

| | |
|----|-----|
| P1 | 5k |
| P2 | 200 |
| P3 | 2k5 |
| P4 | 2k5 |

Kondenzátory

| | |
|----|--------|
| C1 | 4M7/50 |
| C2 | 2M2/50 |
| C3 | 4M7/50 |
| C4 | 22M/25 |
| C5 | 22M/25 |
| C6 | 100n |
| C7 | 47M/25 |
| C8 | 1M/50 |

| | |
|-----|----------|
| C9 | 1M/50 |
| C10 | 100n |
| C11 | 100n |
| C12 | 100n |
| C13 | 1M |
| C14 | 1M |
| C15 | 150p |
| C16 | 100n |
| C17 | 100n |
| C18 | 150p |
| C19 | 100M/16 |
| C20 | 10p |
| C21 | 100M/16 |
| C22 | 100n |
| C23 | 10n |
| C24 | 100n |
| C25 | 470M/25 |
| C26 | 470M/25 |
| C27 | 100n |
| C28 | 100M/25 |
| C29 | 220M/100 |
| C30 | 220M/100 |
| C31 | 100M/25 |

Diody

| | |
|-----|--------|
| D1 | 1N4148 |
| D2 | 1N4148 |
| D3 | 1N4148 |
| D4 | ZD12V |
| D5 | ZD12V |
| D6 | 1N4148 |
| D7 | 1N4148 |
| D8 | 1N4148 |
| D9 | 1N4148 |
| D10 | 1N4148 |
| D11 | 1N4148 |
| D12 | 1N4148 |
| D13 | 1N4148 |
| D14 | 1N4148 |
| D15 | 1N4148 |

| | |
|-----|--------|
| D16 | 1N4148 |
| D17 | 1N4148 |
| D18 | ZD10V |
| D19 | 1N4148 |
| D20 | ZD10V |
| D21 | 1N4148 |
| D22 | 1N4148 |
| D23 | 1N4007 |
| D24 | 1N4007 |
| D25 | 1N4007 |
| D26 | ZD16V |
| D27 | ZD16V |

Tranzistory

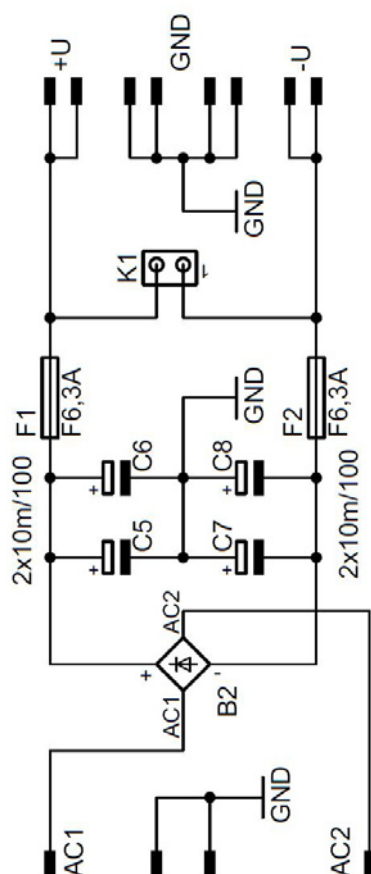
| | |
|-----|---------|
| T1 | BC560 |
| T2 | BC550 |
| T3 | BC550 |
| T4 | 2SC4793 |
| T5 | 2SA1837 |
| T6 | BC556 |
| T7 | BC546 |
| T8 | 2SC5200 |
| T9 | 2SC1943 |
| T10 | 2SC4793 |
| T11 | 2SC5200 |
| T12 | 2SC1943 |
| T13 | 2SC5200 |
| T14 | 2SC1943 |
| T15 | BC548 |
| T16 | BD677 |
| T17 | BD677 |
| T18 | BD678 |

Integrované obvody

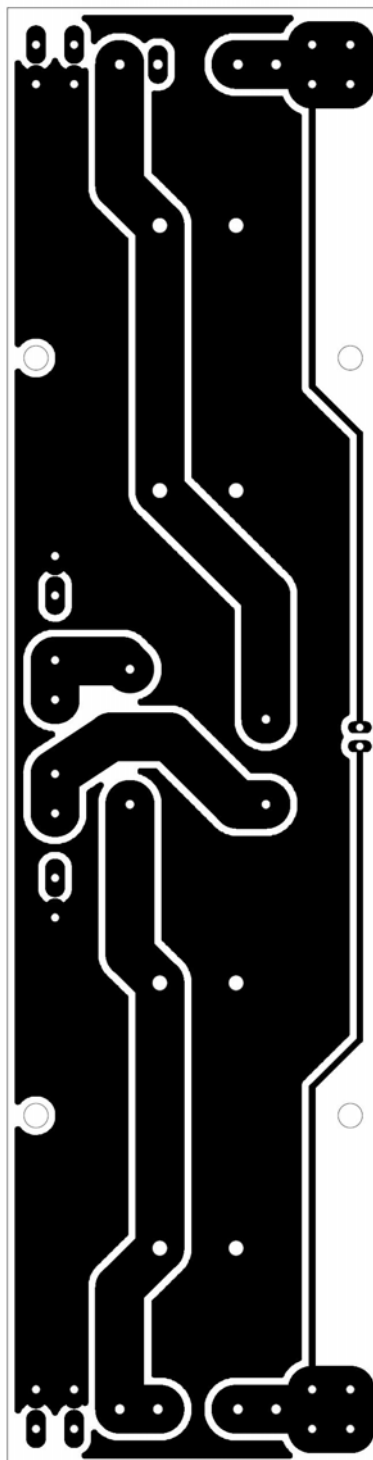
| | |
|-----|----------|
| IC1 | TL064N |
| IC2 | TL062P |
| IC3 | TL062P |
| IC4 | TL062CN |
| IC5 | LME49810 |

B PODKLADY PRO KONSTRUKCI NAPÁJECÍHO ZDROJE

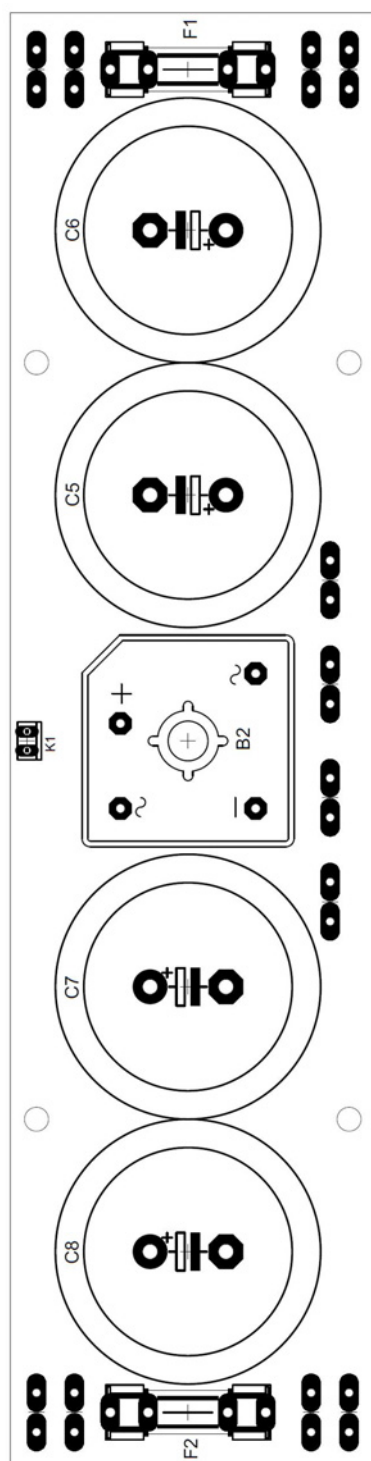
B.1 Schéma zapojení napájecího zdroje



B.2 Strana spojů desky napájecího zdroje (měřítko 1:1)



B.3 Osazovací výkres desky napájecího zdroje



B.4 Seznam komponentů napájecího zdroje

Diodový můstek

| | |
|----|-----------|
| B2 | KBPC3506W |
|----|-----------|

Kondenzátory

| | |
|----|---------|
| C5 | 10m/100 |
|----|---------|

| | |
|----|---------|
| C6 | 10m/100 |
|----|---------|

| | |
|----|---------|
| C7 | 10m/100 |
|----|---------|

| | |
|----|---------|
| C8 | 10m/100 |
|----|---------|

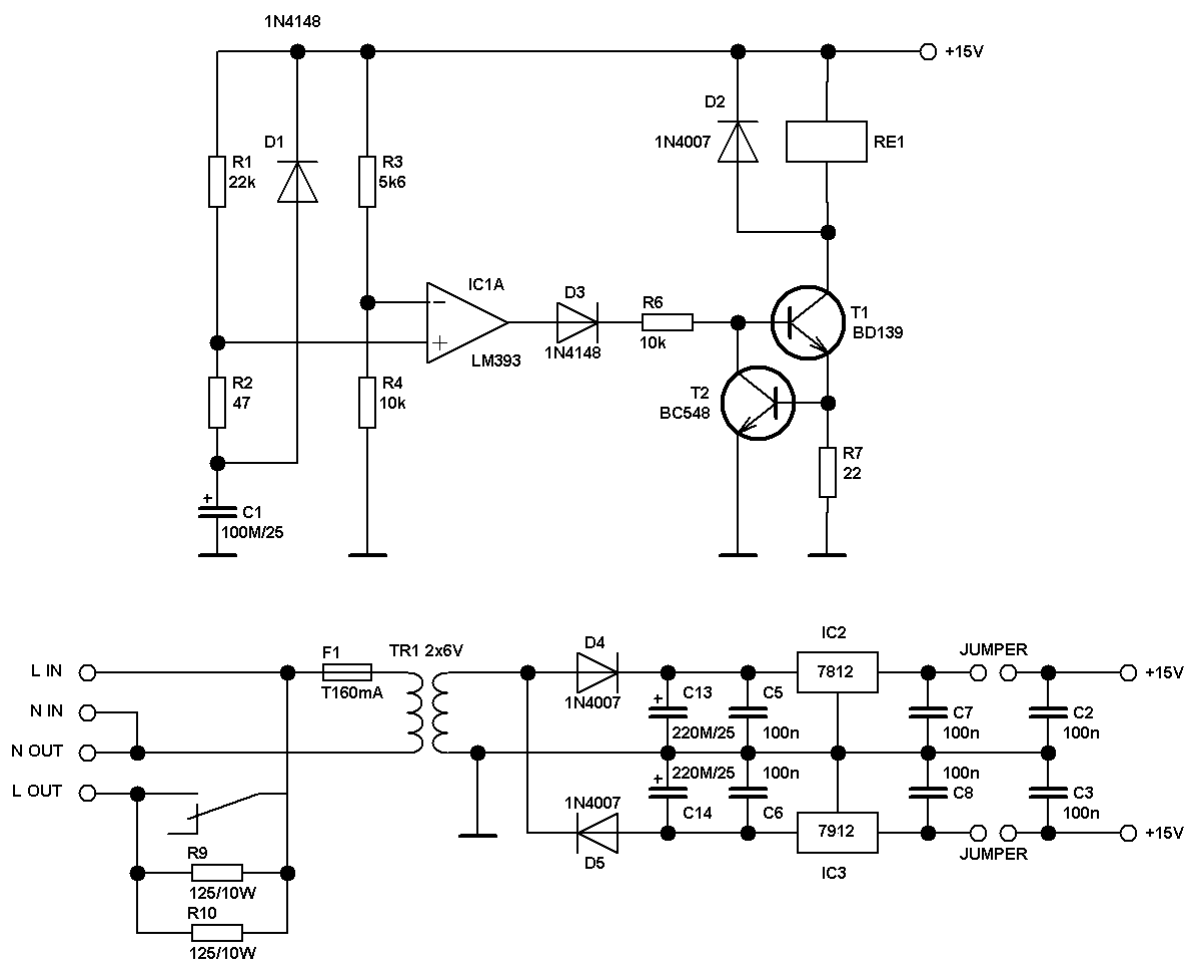
Pojistky

| | |
|----|-------|
| F1 | F6,3A |
|----|-------|

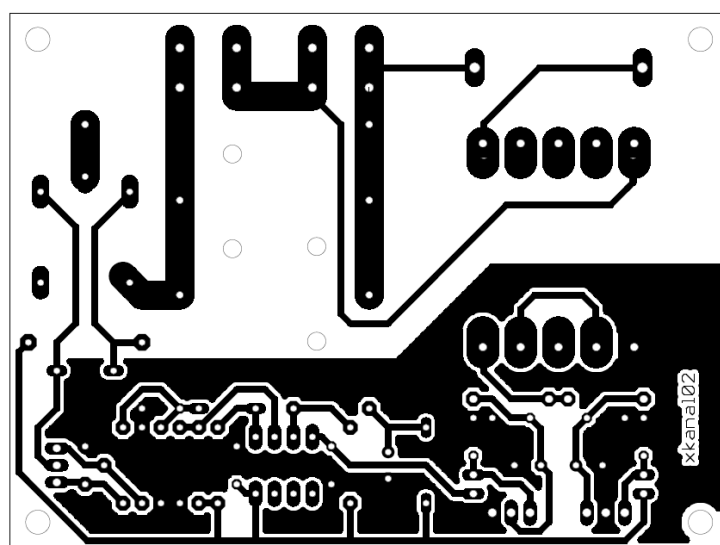
| | |
|----|-------|
| F2 | F6,3A |
|----|-------|

C PODKLADY PRO KONSTRUKCI OBVODU PLYNULÉHO NÁBĚHU ZDROJE

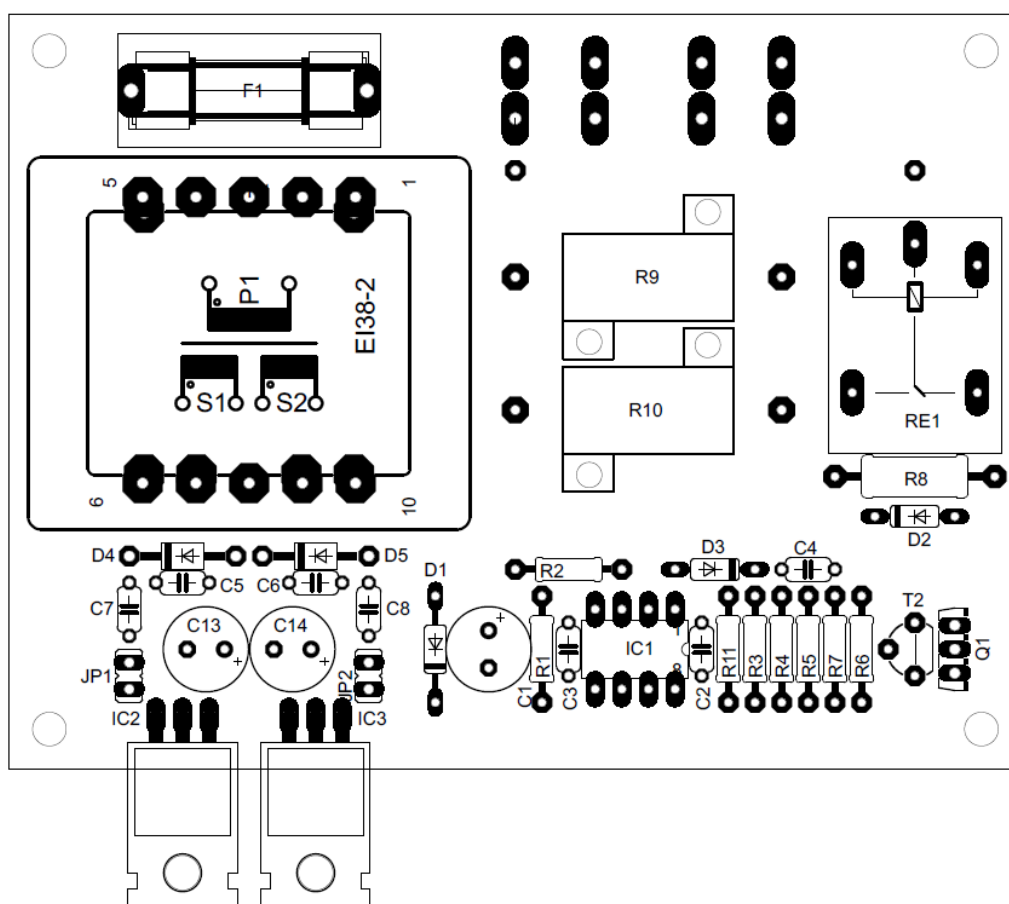
C.1 Schéma zapojení obvodu plynulého náběhu zdroje



C.2 Strana spojů desky obvodu plynulého náběhu zdroje



C.3 Osazovací výkres obvodu plynulého náběhu zdroje



C.4 Seznam komponentů obvodu plynulého náběhu zdroje

Rezistory

| | |
|-----|---------|
| R1 | 22k |
| R2 | 47R |
| R3 | 5k6 |
| R4 | 10k |
| R5 | 100k |
| R6 | 10k |
| R7 | 22 |
| R8 | 0R |
| R9 | 125/10W |
| R10 | 125/10W |

Kondenzátory

| | |
|-----|---------|
| C1 | 100M/25 |
| C2 | 100n |
| C3 | 100n |
| C4 | 100n |
| C5 | 100n |
| C6 | 100n |
| C7 | 100n |
| C8 | 100n |
| C13 | 220M/25 |
| C14 | 220M/25 |

Diody

| | |
|----|--------|
| D1 | 1N4148 |
| D2 | 1N4007 |
| D3 | 1N4148 |
| D4 | 1N4007 |
| D5 | 1N4007 |

Tranzistory

| | |
|----|-------|
| Q1 | BD139 |
| T2 | BC546 |

Integrované obvody

| | |
|-----|--------|
| IC1 | LM393P |
| IC2 | 7812 |
| IC3 | 7912 |

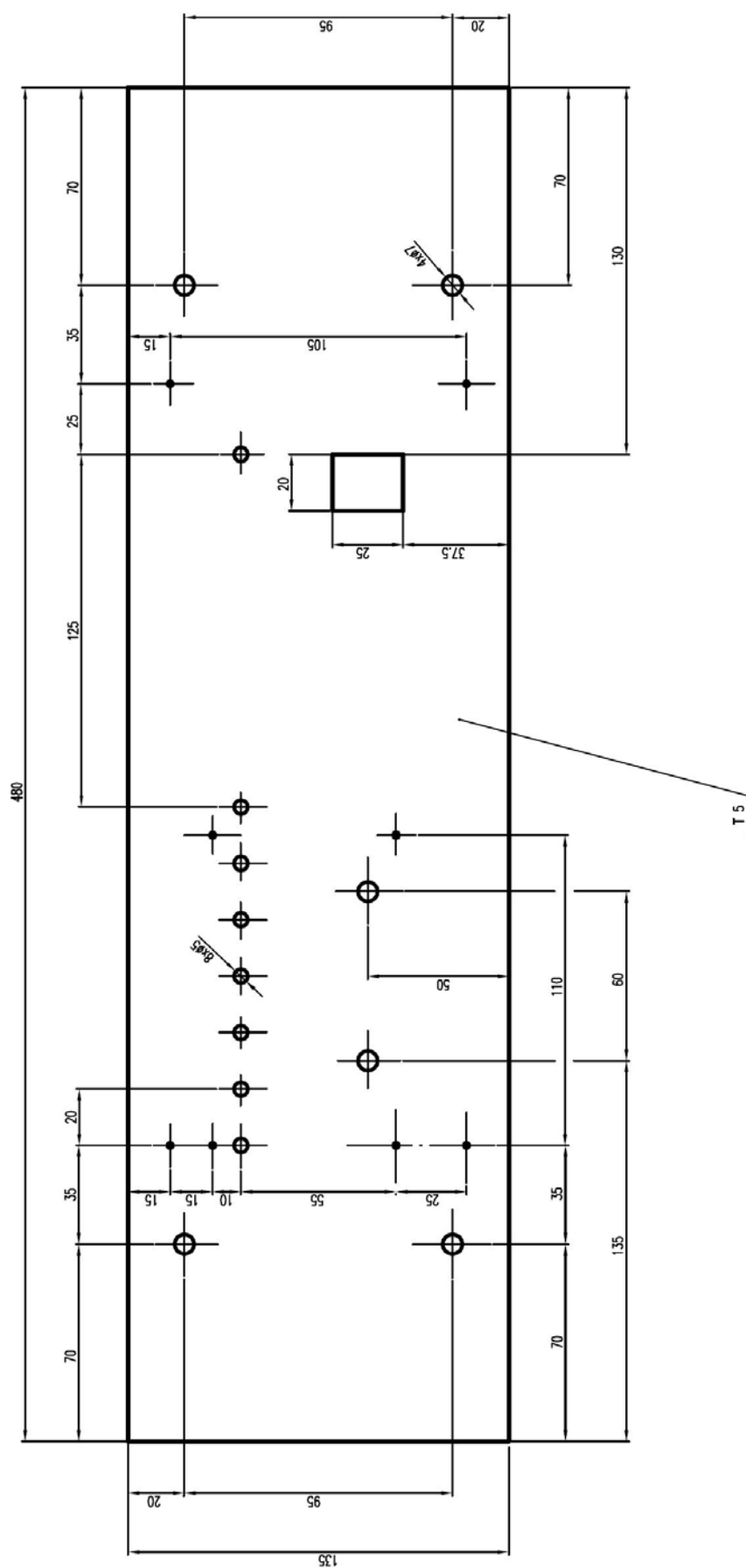
Pojistky

| | |
|----|--------|
| F1 | T160mA |
|----|--------|

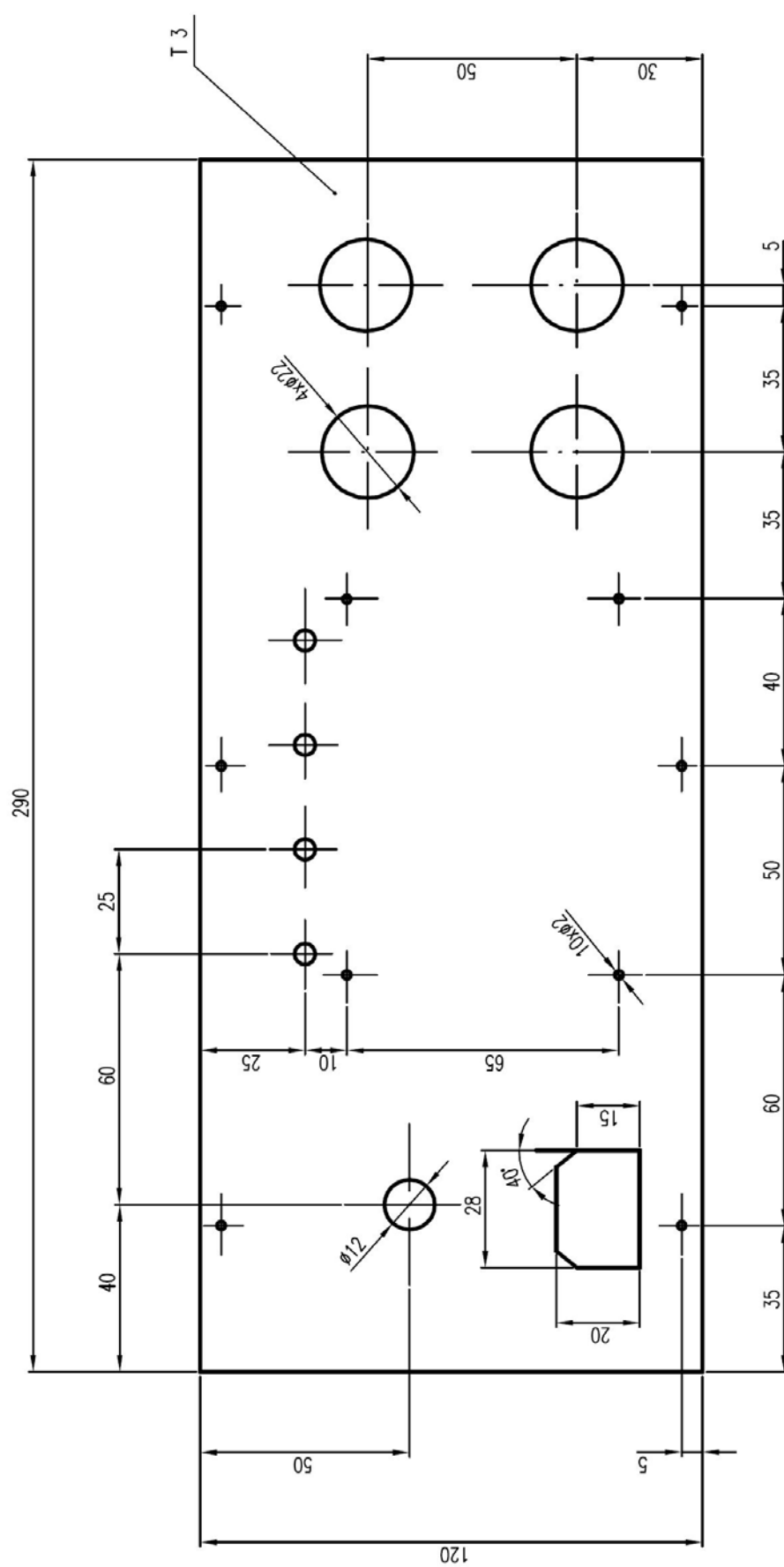
Transformátor

| | |
|----|-----------|
| P1 | 230V/2x6V |
|----|-----------|

D NÁKRES PŘEDNÍHO PANELU ZESILOVAČE



E NÁKRES PŘEDNÍHO PANELU ZESILOVAČE



F NÁKRES HORNÍHO A DOLNÍHO PANELU ZESILOVAČE

